

УДК 533.9.07

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ СТенок РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2020 г. В. П. Ким^{а, *}, Р. Ю. Гниздор^б, В. С. Захарченко^а,
В. Г. Калязин^а, Д. В. Меркурьев^а, С. Ю. Приданников^б

^аНаучно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики
Московского авиационного института (НИИПМЭ МАИ), Москва, 125080 Россия

^бОпытное конструкторское бюро “Факел”, Калининград, 236001 Россия

*e-mail: riame4@sokol.ru

Поступила в редакцию 19.01.2020 г.

После доработки 20.02.2020 г.

Принята к публикации 25.02.2020 г.

Рассмотрена динамика локальных неоднородностей эрозии поверхности стенок разрядной камеры стационарного плазменного двигателя при его длительной работе. Неоднородности приводят к возникновению в начале зоны эрозии со стороны анода “продольных” (вдоль направления движения ионов) прорезей, которые по мере увеличения наработки двигателя углубляются и удлиняются в выходном направлении вплоть до выходного торца стенки разрядной камеры. Показано, что причиной их возникновения, вероятнее всего, является различие в коэффициентах распыления разных фракций керамики, изготовленной горячим прессованием смеси порошков разных материалов. Увеличение длины прорезей обусловлено большей плотностью тока движущихся вдоль прорези ионов на торцевой поверхности стенки, ограничивающей прорезь со стороны ее выходного конца. Возникновение прорезей и их удлинение до выходного торца стенки разрядной камеры, а также закрутка в магнитном поле траекторий движения ионов, падающих на стенки, и появление у них азимутальной компоненты скорости являются важными факторами развития “аномальной” эрозии.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, разрядная камера, зоны эрозии поверхности стенок, распыление ускоренными ионами, продольные прорезы на стенках, магнитное поле, закрутка траекторий ионов, азимутальная компонента скорости, аномальная эрозия.

DOI: 10.31857/S1028096020110084

ВВЕДЕНИЕ

Стационарные плазменные двигатели уже многие годы применяются в космосе [1, 2]. Для обеспечения их высоких характеристик и надежности выполнен обширный комплекс исследований и прикладных разработок. Однако, как в случае любого достаточно сложного устройства, остается недостаточно изученным ряд процессов, происходящих в рассматриваемом двигателе. К числу таких процессов можно отнести так называемую “аномальную” эрозию стенок разрядной камеры, отчетливо наблюдавшуюся в процессе ресурсных испытаний известного двигателя СПД-100 [3, 4] и других двигателей, производимых опытным конструкторским бюро (ОКБ) “Факел” (Россия) с начала 1990-х годов. Развитие “аномальной” эрозии представляет определенный научный интерес, так как этот процесс характеризуется целым рядом неожиданных особенностей. И хотя в ряде работ были предложены

возможные механизмы развития такой эрозии [5–11], причины ее возникновения до настоящего времени недостаточно ясны. Изучение “аномальной” эрозии имеет и прикладное значение, поскольку она влияет на ресурс двигателя. В связи с этим представляет интерес более подробно рассмотреть динамику развития продольных прорезей на поверхностях стенок разрядной камеры в зонах их эрозии, возникающих и развивающихся вдоль направления движения ионов, поскольку их наличие, вероятнее всего, является одним из условий развития “аномальной” эрозии. Это позволит дополнить информацию о рассматриваемых явлениях, чтобы можно было более обоснованно предлагать возможные механизмы и строить теоретические модели процессов, приводящих к “аномальной” эрозии, что было целью настоящей работы.

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ “АНОМАЛЬНОЙ” ЭРОЗИИ СТЕНОК РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эффект “аномальной” эрозии наиболее отчетливо проявился в конце ресурсных испытаний в течение 5700 ч двигателей СПД-100 первого поколения, проводившихся в Jet Propulsion Laboratory (JPL, USA) в целях сертификации двигателя и подтверждения его соответствия требованиям “западных” стандартов [3]. После этого этапа испытания того же двигателя были продолжены в ОКБ “Факел” до общей наработки 7000 ч [4].

Как известно, двигатель типа СПД-100 представляет собой плазменный ускоритель, в котором поток рабочего вещества в газообразном (парообразном) состоянии подается в кольцевой ускорительный канал с открытым выходом, ионизируется в плазме электрического разряда, горящего преимущественно в продольном электрическом и радиальном магнитном (“скрещенных”) полях, а образовавшиеся ионы ускоряются электрическим полем в основном в выходном направлении [1, 2]. В процессе ускорения ионов создается реактивная тяга, которая используется для управления движением космических аппаратов. Типичной в современных стационарных плазменных двигателях оказывается ситуация, когда ионы ускоряются электрическим полем с напряженностью E в основном в достаточно узком слое-зоне ускорения, в котором действует поперечное к электрическому, преимущественно радиальное магнитное поле с индукцией B . Усредненное движение электронов происходит в азимутальном (перпендикулярно E и B) направлении со скоростью $u = E \times B / B^2$ так называемого электрического дрейфа. Плазма разряда в ускорительном канале разреженная, и столкновения с атомами и ионами мало возмущают азимутальное движение электронов по кольцеобразным траекториям внутри ускорительного канала. Поэтому усредненные траектории электронов оказываются в зоне ускорения почти замкнутыми. С учетом вышесказанного, стационарный плазменный двигатель называют еще ускорителем или двигателем с замкнутым дрейфом электронов.

Ускорительный канал в этих двигателях формируют стенки диэлектрической (керамической) разрядной камеры, изготовленной из теплостойкой и стойкой к распылению ускоренными ионами керамики. В частности, в двигателе СПД-100 разрядная камера изготовлена из керамики, полученной горячим прессованием смеси порошков нитрида бора и двуокиси кремния. Часть ускоренных ионов попадает на участки стенок камеры, ограничивающие плазму разряда в области зоны ускорения в радиальном направлении, и распыляет материал стенки. Этот процесс в зна-

чительной мере определяет ресурс двигателя, который должен быть у таких двигателей на уровне 5000–10000 ч и больше. Для подтверждения ресурса обычно проводят ресурсные испытания двигателя в вакуумных камерах больших размеров в условиях, имитирующих условия работы двигателя в космосе. При полномасштабных ресурсных испытаниях длительность работы двигателя превышает гарантийный ресурс двигателя, не допускается вскрытие вакуумной камеры и напуск воздуха в нее до окончания испытаний. Для типичного современного двигателя с гарантийным ресурсом 5000–7000 ч время работы двигателя при испытаниях составляет 7000–10000 ч, а календарная длительность испытаний составляет около двух лет и более. Поэтому стоимость проведения ресурсных испытаний велика, и для каждого нового двигателя проводится ограниченное число длительных испытаний, а получаемые в результате таких испытаний данные являются уникальными. К числу таких результатов относится и обнаружение “аномальной” эрозии.

Суть эффекта “аномальной” эрозии может быть проиллюстрирована на примере результатов ресурсных испытаний двигателя СПД-100 [3, 4]. Заключается он в том, что на выходных частях наружной стенки разрядной камеры, т.е. в выходной части зоны эрозии, появились достаточно глубокие прорезы специфической формы (рис. 1), а именно: после работы двигателя в течение примерно 5700 ч на внутренней поверхности выходной торцевой части наружной стенки разрядной камеры появились более или менее регулярные (с шагом 1–2 мм) прорезы. Их стенки были отклонены в азимутальном направлении от нормали к усредненной поверхности стенки в одну сторону, т.е. отчетливо проявилась азимутальная асимметрия профилей стенок, ограничивающих прорезы.

Вопросы о причинах возникновения “аномальной” эрозии, на которые пока нет убедительных ответов, сводятся к следующим. Почему появляются прорезы на стенках и чем вызвана их пространственная “регулярность” или “нерегулярность”? Чем вызвана азимутальная асимметрия, т.е. одностороннее отклонение образующихся прорезей и их стенок в азимутальном направлении от нормали к усредненной поверхности стенок?

Одним из простых объяснений азимутальной асимметрии профилей стенок может быть преимущественная зарядка части поверхностей стенок продольных прорезей (если они были), обращенных к направлению дрейфа электронов, и большее отрицательное смещение потенциала этих поверхностей вследствие большей плотности потока электронов на них, приводящее к увеличению энергии выпадающих на них ионов, и к

увеличению скорости их распыления. Но, как будет показано ниже, в области выходных торцов стенок разрядной камеры, где в первую очередь проявляется “аномальная” эрозия, дрейф электронов не может быть значительным в силу специфики электрического и магнитного полей в этой области. Кроме того, для обоснования такой гипотезы необходимо объяснить возникновение продольных прорезей в области “аномальной” эрозии.

Принято также считать, что величина шага сопоставима с ларморовским радиусом электронов. И на этом строятся определенные модели возникновения “аномальной” эрозии. Действительно, величина ларморовского радиуса $R_e = V_e/\omega_e$ определяется скоростью электронов V_e и их циклотронной частотой $\omega_e = eB/m$, где e , m — соответственно, заряд и масса электрона. При типичной энергии электронов ~ 10 эВ в выходной части зоны ускорения их скорость составляет величину $\sim 2 \times 10^8$ см/с. Циклотронная частота в окрестности выходного торца наружной стенки с учетом увеличения магнитной индукции при приближении к магнитному полюсу составляет величину порядка 1×10^9 с⁻¹, т.е. $R_e \sim 2$ мм, что действительно близко к шагу возникающих прорезей. Однако пока нет убедительных физических моделей, которые позволяют объяснить это совпадение.

Следует отметить, что в задачи настоящей работы не входило обсуждение существующих гипотез и теорий возникновения “аномальной” эрозии. Но важно отметить, что в большинстве исследований рассматриваемого эффекта внимание авторов концентрировалось на анализе финального результата аномальной эрозии (рис. 1). Поэтому основной задачей настоящего исследования было проведение качественного анализа процессов возникновения и развития “продольных” прорезей (развивающихся на поверхностях стенок в зоне эрозии примерно в направлениях, соответствующих направлениям движения ионов у стенок) как одного из условий развития “аномальной” эрозии. Это позволит более полно представить процесс развития “аномальной” эрозии для построения возможных моделей рассматриваемых процессов.

ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ “ПРОДОЛЬНЫХ” ПРОРЕЗЕЙ НА СТЕНКАХ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ

Для решения сформулированной задачи был пересмотрен и проанализирован архив фотографий стенок разрядной камеры при разных наработках двигателей на ресурс. Наиболее ценными оказались фотографии, полученные в процессе ресурсных испытаний двигателя СПД-100 в JPL, поскольку в процессе этого испытания удалось получить фотографии отдельных участков по-

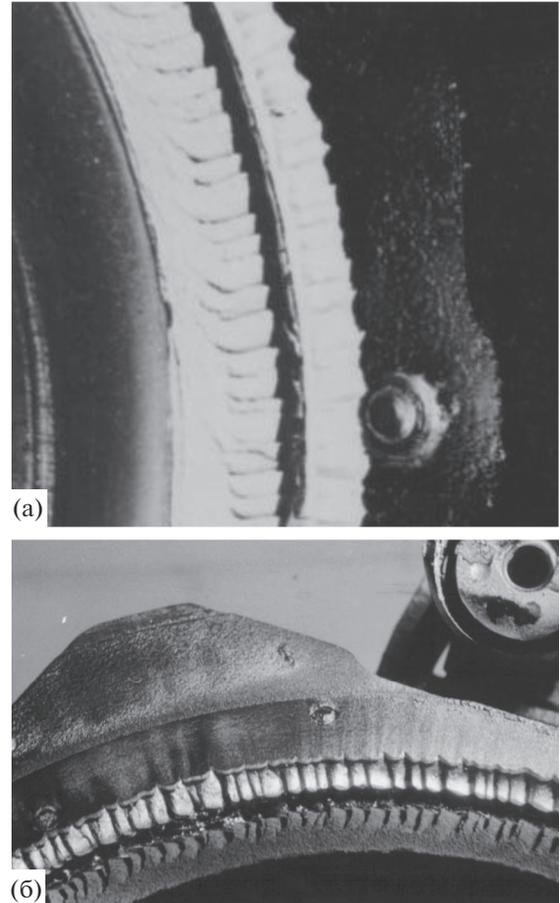


Рис. 1. Вид прорезей наружной стенки и полюса магнитной системы стационарного плазменного двигателя СПД-100: а — после наработки на ресурс в течение 5700 ч в JPL [3]; б — после общей наработки ~ 7000 ч при испытаниях в ОКБ “Факел”.

верхностей стенок при разных наработках двигателя. Следует отметить, что рассматриваемые ресурсные испытания проводились в вакуумной камере диаметром 3.1 м, и двигатель фотографировали при разных наработках через иллюминатор на стенке вакуумной камеры с расстояния более 2 м без использования специально разработанной для этой цели фотоаппаратуры, которую можно было бы разместить внутри камеры на меньшем расстоянии от двигателя. В программе этого и других проведенных ресурсных испытаний обычно не закладывали необходимость детального контроля возникающих неоднородностей или каких-либо других особенностей изменения локальных участков поверхностей стенок, подвергающихся эрозии. Поэтому качество полученных снимков оставляет желать лучшего. Но оно оказалось достаточным для качественного анализа развития “продольных” прорезей на стенках разрядной камеры. Следует добавить, что в настоящее время требования к ресурсу двигате-

лей возрастают. Поэтому дальнейшие исследования особенностей износа стенок разрядной камеры, в том числе их “аномальной” эрозии, сохраняют свою актуальность.

Во многих работах показано, что глобальное изменение геометрии поверхности стенок разрядной камеры при длительных испытаниях происходит под действием бомбардировки ускоренными ионами, попадающими на стенки [12, 13]. Скорость ξ локального перемещения поверхности стенки по нормали к ней вследствие ее бомбардировки ионами и удаления распыленного материала стенки можно записать в следующем виде:

$$\xi = j_i S_V(\varphi, \varepsilon_i), \quad (1)$$

где j_i , $S_V(\varphi, \varepsilon_i)$ – соответственно, плотность ионного тока на стенке и объемный коэффициент распыления материала поверхности [мм³/Кл], зависящий от угла φ падения ионов на поверхность и их энергии ε_i . Поэтому ионная бомбардировка, основной фактор изменения геометрии поверхности, в любом случае должна быть одним из ключевых факторов возникновения и “аномальной” эрозии стенок. Весь вопрос в том, достаточно ли ее для объяснения “аномальной” эрозии и какие факторы определяют ее специфику. Для получения ответа на этот вопрос были более подробно рассмотрены процессы развития “продольных” прорезей на стенках разрядной камеры в процессе длительных испытаний как одного из условий развития “аномальной” эрозии.

Следует отметить, что коэффициенты $S_V(\varphi, \varepsilon_i)$ распыления разных материалов значительно различаются и возрастают с увеличением энергии ионов. Так, коэффициенты распыления керамик при одних и тех же значениях энергии ионов в несколько раз меньше коэффициентов распыления железа и сталей. Коэффициент распыления нитрида бора, одного из компонентов керамики, из которой была изготовлена разрядная камера рассматриваемого двигателя СПД-100, примерно в 1.6–1.7 раз меньше коэффициента распыления второго компонента керамики – двуокиси кремния [14]. Кроме того, коэффициенты распыления зависят от угла падения ионов. Обычно рассматривают относительные коэффициенты распыления $\bar{S}_V(\varphi, \varepsilon_i) = S_V(\varphi, \varepsilon_i) / S_V(\varphi = 0, \varepsilon_i)$. Они сначала возрастают до углов падения падения 50°–60°, соответствующих максимальным значениям, а затем быстро убывают до нуля при углах 85°–90°. В области максимальных значений коэффициенты распыления компонентов керамики и значения $\bar{S}_V(\varphi, \varepsilon_i)$ отличаются до 1.5 раз. Таким образом, при длительной работе двигателя типа СПД-100 имели место предпосылки для распыления компонентов керамики с разной скоростью.

Следует также отметить, что в исходном состоянии двигателя СПД-100 выходные торцы стенок разрядной камеры выступают в выходном направлении над плоскостью близлежащего полюса. По мере износа стенок они укорачиваются, и их торцы приближаются к плоскости полюсов и “стачиваются” ионным потоком так, что огибающие поверхность стенок линии становятся близкими к радиальным направлениям силовых линий магнитного поля вблизи магнитного полюса (рис. 2). При попадании торцов стенок в межполюсный зазор начинается интенсивная эрозия магнитного полюса (рис. 1, 2), что свидетельствует о том, что направления траекторий ионов в ней близки к радиальным. Существование “радиальных” потоков ионов с достаточно большой энергией у выходных торцов стенок разрядной камеры подтверждается результатами измерений [15, 16]. В свою очередь, это означает, что электрическое поле в этой области также близко к радиальному, т.е. близко к направлениям силовых линий магнитного поля. Поэтому, как уже отмечалось ранее, электрический дрейф электронов и его роль в азимутально асимметричной зарядке поверхностей стенок продольных прорезей дрейфующими электронами у выходных торцов стенок разрядной камеры существенно ослаблены.

Из рис. 3а видно, что к моменту наработки, составившей 4332 ч, на всей поверхности зоны эрозии образовались продольные прорези, из-за чего выходной торец стал рифленным. Вследствие этого внутренняя поверхность магнитного полюса, обращенная к разрядной камере, начала приобретать рифленую структуру (рис. 3б, 3в). Это можно объяснить тем, что движущийся у стенки радиальный поток ускоренных ионов распыляет материал наружного полюса через рифленый торец наружной стенки разрядной камеры, как через маску. Поэтому часть ускоренного потока ионов, проходящая через углубления в этой маске, начинает распылять полюс более интенсивно, чем в тех частях наружной стенки разрядной камеры, где остается еще не распыленный материал стенки (рис. 3в).

Из приведенных рисунков видно также, что признаки “аномальной” эрозии выходного торца наружной стенки появились после наработки 4332 ч, а после наработки 5700 ч она стала уже очевидной, а именно: стали отчетливо видны признаки азимутальной асимметрии прорезей на выходной части поверхности торца наружной стенки (рис. 3б, 3в). Кроме того, интенсивность эрозии стенки и полюса неравномерна по азимуту, а в месте более интенсивной эрозии полюса стенки зубцов почти плоские. Направление одной из стенок близко к радиальному, а вторая стенка наклонена под достаточно большим углом относительно этого направления. Таким образом, зубцы как бы наклонены относительно нор-

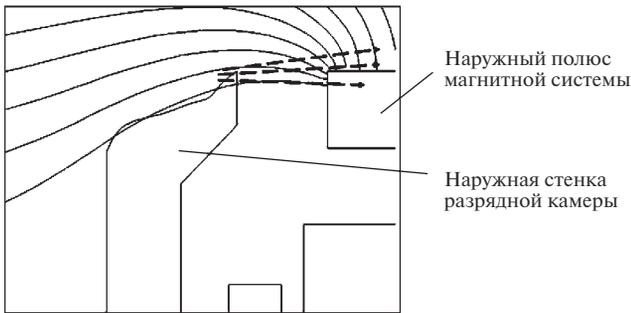


Рис. 2. Схема взаимного расположения наружной стенки разрядной камеры относительно внешнего полюса и магнитных силовых линий (криволинейные линии) после 4332 ч работы двигателя (пунктирными стрелками показаны проекции направлений движения ионов на плоскость продольного сечения разрядной камеры).

мали к усредненной поверхности полюса примерно в том же направлении, что и прорезы в выходной части наружной стенки (рис. 3в), т.е. также имеют азимутальную асимметрию. Это свидетельствует о том, что форма пучков ионов, прошедших через прорезы на выходном торце наружной стенки разрядной камеры, также асимметрична в азимутальном направлении и близка к форме щели в стенке разрядной камеры. Косвенно это свидетельствует о том, что именно эти пучки пробивали щели в наружной стенке, а также о том, что они имели азимутальную асимметрию.

Переходя к анализу общих тенденций развития прорезей на поверхности стенок разрядной камеры в зонах эрозии, можно отметить, что на первом этапе рассмотренных ресурсных испытательных прорезы появились в части зон эрозии со стороны анода (рис. 4а). Затем они развились на всю глубину этой зоны (рис. 3б, 4б). На внутренней стенке они начали отчетливо проявляться только после наработки в течение 5700 ч в JPL и не вышли на ее выходной торец даже после наработки в течение 7000 ч в ОКБ “Факел” (рис. 5). Качественное отличие внутренней стенки от наружной состоит в том, что для нее предусмотрен больший износ. Поэтому остался запас ее толщины, отделяющий плазму разряда от внутреннего магнитного полюса. Таким образом, эрозия внутренней стенки демонстрирует то, что прорезы, образовавшиеся на стенке, не обязательно развиваются на всю длину зоны эрозии даже при длительной работе двигателя. Но важно то, что развитие “аномальной” эрозии четко связано с прорезями на стенке выходного торца, образовавшимися ранее (рис. 3б, 3в). Поэтому представляет интерес понять причины развития прорезей на поверхности стенки во времени.

Полезную информацию о возможных причинах возникновения прорезей дают даже относи-

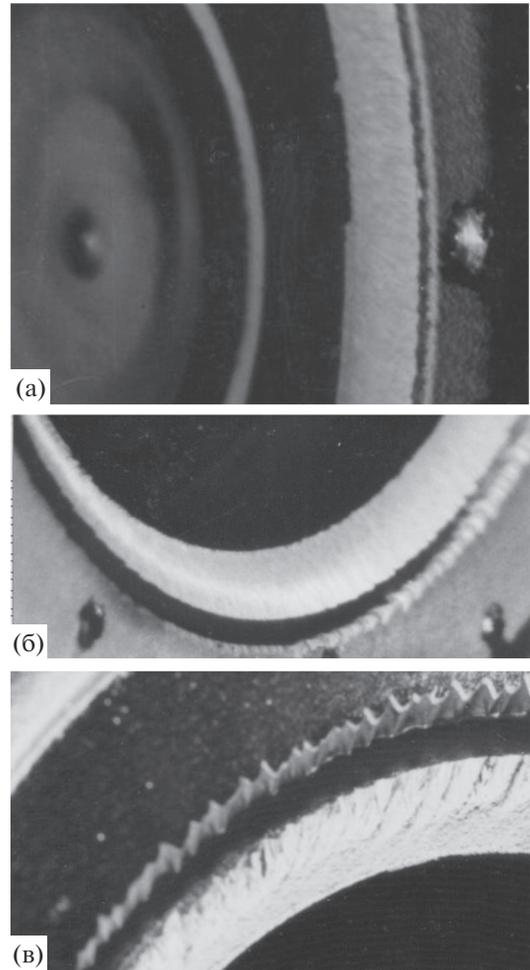


Рис. 3. Картина износа наружной стенки разрядной камеры двигателя СПД-100: а — после наработки в течение 4332 ч; б, в — после наработки в JPL в течение 5700 ч.

тельно короткие испытания стационарного плазменного двигателя. Так, на рис. 6 приведены фотографии зоны эрозии на наружной стенке разрядной камеры экспериментального образца двигателя СПД-100ВТ (ЭО СПД-100ВТ) после его эрозионных испытаний в течение 150 ч в НИИПМЭ МАИ [17]. В начале зоны эрозии появляются островки менее распыленного материала с продольными ложбинками между ними (рис. 6а), которые могут развиваться в прорезы (рис. 6б).

Развитие этого процесса легко понять, если учесть, что разрядная камера ЭО СПД-100 ВТ, как и в двигателе СПД-100, была изготовлена из керамики типа боросил горячепрессованный, изготовленной из смеси порошков нитрида бора и двуокиси кремния. Поскольку составляющие этой керамики имеют различные коэффициенты распыления ускоренными ионами, при работе двигателя имеет место эффект селективного трав-

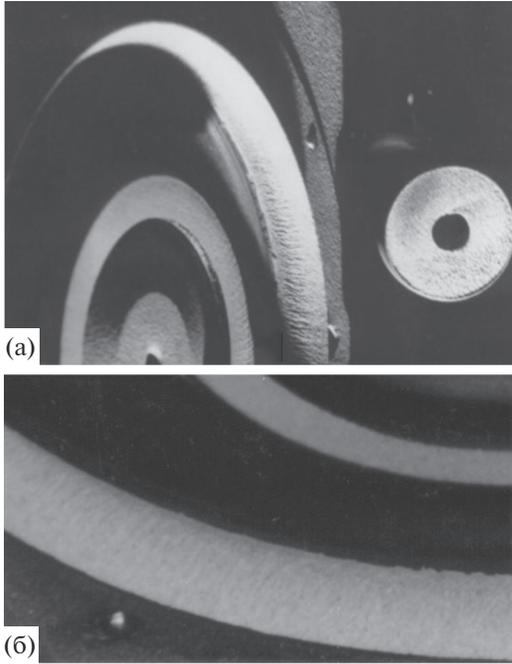


Рис. 4. Фотографии зон эрозии на наружной стенке после наработки двигателя СПД-100 в JPL в течение: а – 916; б – 1407 ч.

ления поверхности ускоренным ионным потоком, часть которого попадает на стенки. Островки более стойкого материала защищают участки поверхности, находящиеся за ними в направлении движения ионов. После того как образовались небольшие прорезы, выходные части ограничивающих их стенок должны распыляться с большей скоростью по сравнению с боковыми стенками, которых “касается” ионный поток, в силу большей, чем на боковых стенках, плотности тока ионов, а также малого коэффициента распыления боковых стенок из-за больших углов падения ионов на их поверхность. Поэтому прорез может углубляться и расти в длину вплоть до конца зоны эрозии (рис. 3а, 3б).

Дополнительную информацию о развитии прорезей дали ресурсные испытания и других двигателей. Так, в двигателе СПД-70 ОКБ “Факел” после наработки около 1000 ч торец наружной стенки выступал над плоскостью наружного полюса примерно на 1 мм. На внутренней стенке прорезы еще не появились (рис. 7а), а на внешней стенке они достаточно четкие (рис. 7б). Анализ мест начального образования прорезей свидетельствует о том, что их образование начинается в сечениях стенки, где в результате эрозии появляется изгиб профиля, аналогичный тому, что был на внутренней стенке двигателя СПД-100 (рис. 5). Примечательным является также то, что на прорезях видны признаки закрутки их начальных частей (рис. 7)

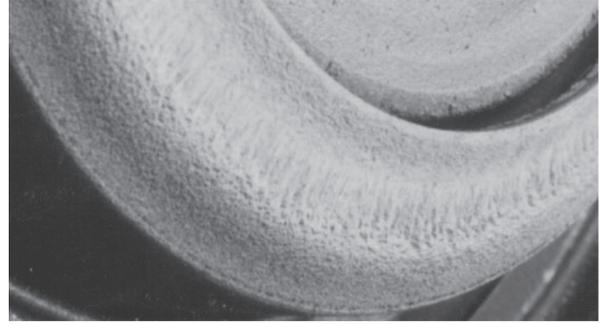


Рис. 5. Картина износа внутренней стенки после наработки двигателя СПД-100 в JPL в течение 5700 ч.

и азимутальной асимметрии стенок прорезей, т.е. также проявились признаки “аномальной” эрозии. Таким образом, признаки “аномальной” эрозии проявляются и при относительно небольших наработках двигателя и не обязательно на выходе из зоны эрозии.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из приведенных выше данных следует, что одно из условий возникновения признаков “аномальной” эрозии – появление на стенке разрядной камеры “продольных” прорезей, т.е. их можно рассматривать как первый этап перехода к “аномальной” эрозии. Они возникают как на наружной, так и на внутренней стенке разрядной камеры, и в начале (со стороны анода) зоны эрозии. Поэтому можно предположить, что развитие прорезей начинается в сечениях стенки, на которые попадают ионы под углами, при которых разность максимальных значений коэффициента распыления значительна. Эта разница приводит к травлению поверхности и возникновению первичных углублений на стенках, которые дальше могут развиваться в прорезы вдоль направлений движения ионов в соответствии с изложенным ранее механизмом более быстрого распыления выходных частей стенок углублений и прорезей.

Для возникновения азимутальной асимметрии прорезей у ионов должна появиться азимутальная составляющая скорости, а условия для ее возникновения в зоне ускорения стационарного плазменного двигателя со скрещенными электрическим и магнитным полями есть всегда. Действительно, траектории ионов могут заметно закручиваться под действием силы Лоренца \mathbf{F} :

$$\mathbf{F} = q[\mathbf{E} + (\mathbf{V}_i \times \mathbf{B})], \quad (2)$$

где q , \mathbf{V}_i – соответственно, заряд и скорость иона. Поскольку ионы ускоряются в скрещенных электрическом и магнитном полях, по мере увеличения их скорости вследствие ускорения электри-

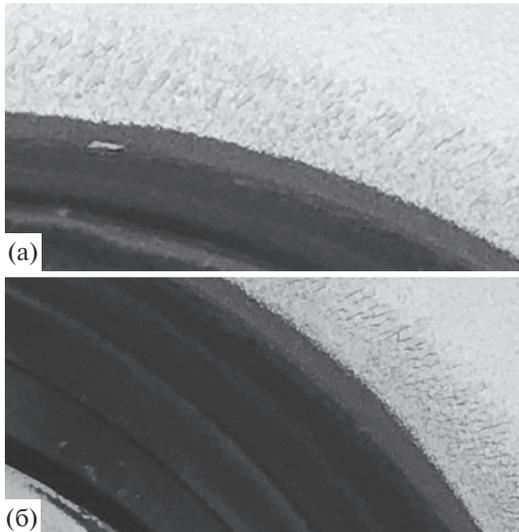


Рис. 6. Фото разных участков края зоны эрозии (со стороны анода) на наружной стенке разрядной камеры ЭО СПД-100ВТ после его испытаний в течение 150 ч.

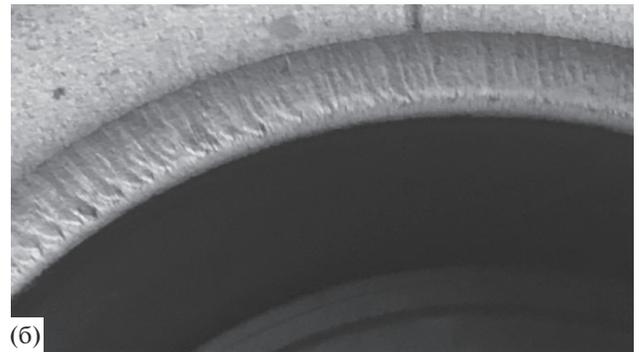


Рис. 7. Общий вид выходной части двигателя СПД-70 после его испытаний в течение 1000 ч.

ческим полем начинает действовать второе слагаемое в выражении (2), и ионы начинают закручиваться поперек направлений V_i и B , т.е. в азимутальном направлении. При появлении такой составляющей скорости ионы должны более интенсивно распылять одну из стенок прорезей. Оценку азимутальной составляющей скорости можно получить с учетом того, что ионы массой M стартуют после их появления с нулевой скоростью. Тогда их скорости в момент времени t после появления в направлении ускорения x и в поперечном к нему азимутальном направлении y можно записать в следующем виде [18]:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \frac{q}{M} Et + \frac{q}{M} By, \\ \frac{dy}{dt} &= -\frac{qB}{M} x = -\frac{E}{B} \left(1 - \cos \frac{qB}{M} t \right). \end{aligned} \quad (3)$$

В стационарных электрическом и магнитном полях азимутальная составляющая скорости ионов относительно невелика. Однако при наличии колебаний в плазме она может достигать значений, сопоставимых с продольной составляющей [19], т.е. может быть существенной. Следует также отметить, что закрутка ионов и искривление прорези сказывается на первой половине прорези, а вторая ее часть спрямляется (рис. 7). Это свидетельствует о том, что отношение азимутальной и продольной составляющих скорости ионов, выпадающих на стенки прорези по мере перемещения в выходном направлении, выравнивается. Последнее может быть объяснено тем, что по ме-

ре перемещения вдоль прорези к магнитному полюсу увеличение как продольной, так и азимутальной составляющих скорости ионов замедляется в силу отмеченной ранее специфики электрического и магнитного полей в окрестности наружного полюса магнитной системы (рис. 2). Поэтому закрутка ионов слабо влияет на форму прорезей на их выходных участках.

Таким образом, приведенные рассуждения могут объяснить на качественном уровне возникновение “аномальной” эрозии. Следует также добавить, что рассмотренный механизм возникновения азимутальной асимметрии прорезей должен работать всегда и может работать совместно с другими механизмами, например, с повышенным смещением потенциала поверхностей стенок, ограничивающих прорези и обращенных к направлению дрейфа электронов, и повышенным их распылением из-за увеличения энергии падающих на поверхность ионов. К сказанному следует добавить, что закрутка ионов и дрейф электронов происходят в одном и том же направлении. Поэтому они могут “помогать” друг другу в развитии “аномальной” эрозии. Для получения количественного сравнения эффективности различных механизмов необходимо провести дальнейшие исследования с учетом описанных особенностей развития прорезей на стенках разрядной камеры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные данные свидетельствуют о том, что значительную роль в развитии эффектов “аномальной” эрозии стенок разрядной камеры стационарного плазменного двигателя при длительной работе может играть образование продольных прорезей на ее стенках и закрутка траекторий движения ионов в магнитном поле.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории JPL, предоставившим фотографии поверхностей стенок, полученных в процессе ресурсных испытаний двигателя СПД-100. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта с уникальным идентификатором RFMEFI60419X0212.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kim B.П.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 3. С. 45.
2. *Lev D., Myers R.M., Lemmer Kr.M. et al.* // Proc. 35th Int. Electric Propulsion Conf. Atlanta, USA, 2017. IEPC 2017-242.
3. *Garner Ch.E., Polk J.E., Pless L.C. et al.* // Proc. 23rd Int. Electric Propulsion Conf. Seattle, USA, 1993. IEPC 2013-091.
4. *Arhipov B.A., Bober A.S., Gnizdor R.Y. et al.* // Proc. 24th Int. Electric Propulsion Conf. Moscow, Russia, 1995. IEPC-1995-039.
5. *Morozov F.I.* // Plasma Phys. Rep. 2003. V. 29. P. 235.
6. *Elovikov S.S., Khartov S.A.* // Proc. 30th Int. Electric Propulsion Conf. Florence, Italy, 2007. IEPC-2007-008.
7. *Tsikata S., Honore C., Lemoine N., Gresillon D.M.* // Phys. Plasmas. 2010. V. 17. P. 112110.
8. *Taccogna F., Longo S., Capitelli M., Schneider R.* // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 94. P. 251502.
9. *Zhang F.K., Yu D.R., Ding Y.J., Li H.* // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. P. 111501.
10. *Tsikata S., Lemoine N., Pisarev V., Gresillon D.M.* // Phys. Plasmas. 2009. V. 16. P. 033506.
11. *Sarrailh P., Belhaj M., Inguibert V. et al.* // Proc. 35th Int. Electric Propulsion Conf. Atlanta, USA, 2017. IEPC-2017-314.
12. *Kim B.* // Источники и ускорители плазмы. Вып. 6. Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1982. С. 7.
13. *Kim V., Abgaryan V., Kozlov V. et al.* // Proc. Joint Propulsion Conf. Huntsville, USA, 2003. AIAA-2003-5003.
14. *Белан Н.В., Kim В.П., Оранский А.И., Тихонов В.Б.* Стационарные плазменные двигатели. Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1989. С. 216.
15. *Kim В.П., Меркурьев Д.В., Сидоренко Е.К.* // Вестн. МАИ. 2014. Т. 21. № 1. С. 95.
16. *Kim В.П., Архипов А.С., Бишаев А.М. и др.* // Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 10. С. 937.
17. *Kim В.П., Гниздор Р.Ю., Грдличко Д.П. и др.* // Космические исследования. 2019. Т. 57. № 5. С. 323.
18. *Колесников П.М.* // Электродинамическое ускорение плазмы. М.: Атомиздат, 1971. С. 54.
19. *Веселовзоров А.Н., Длугач Е.Д., Погорелов А.А. и др.* // ЖТФ. 2013. Т. 38. № 7. С. 968.

Peculiarities of the Discharge Chamber Wall Surface Deformation During Long Stationary Plasma Thruster Operation

V. P. Kim^{1,*}, R. Yu. Gnizdor², V. S. Zakharchenko¹, V. G. Kalyazin¹,
D. V. Merkurev¹, S. Yu. Pridannikov²

¹Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics (RIAME MAI), Moscow, 125080 Russia

²Experimental design Bureau “Fakel”, Kaliningrad, 236001 Russia

*e-mail: riame4@sokol.ru

The dynamics of the Stationary Plasma Thruster discharge chamber wall surfaces local non uniformities during its long operation is considered. These non uniformities lead to the appearance of the “longitudinal” (along the ion motion direction) slits at the anode side of erosion zones which are becoming deeper and longer with increase of the thruster operation time. It is shown that the probable reason of their appearance is the difference of sputtering characteristics of the ceramics fractions manufactured by the hot pressing of the different material powders mixture. Appearance of these slits and increase of their length as well as the turning of ion trajectories by magnetic field causing appearance of the ion velocity azimuth component are to be important factors of the “anomalous” discharge chamber wall erosion.

Keywords: stationary plasma thruster, discharge chamber, wall erosion zones, sputtering by the accelerated ions, longitudinal slits on the walls, magnetic field, turning of the ion trajectories, azimuth velocity component, anomalous erosion