**Микроплазменные разряды на металлах:**

**эксперимент, теория, приложения**

Иванов В.А., Сахаров А.С.

*Институт общей физии им. А.М. Прохорова РАН, Москва, ivanov@fpl.gpi.ru*

Микроплазменный разряд [1] на поверхности металла возникает в результате взаимодействия импульсного потока плазмы с металлом, на поверхность которого нанесена тонкая диэлектрическая пленка с толщиной ~1 мкм. При этом внешняя поверхность пленки заряжается и приобретает положительный электрический потенциал относительно металла, находящегося под отрицательным потенциалом ~100 В. Между поверхностью диэлектрической пленки и открытой поверхностью металла возникают сильные электрические поля ~1 МВ/см. Эти поля инициируют сначала поверхностный пробой по краю диэлектрической пленки, а плотная плазма электрического пробоя вызывает взрывную электронную эмиссию из металла. В местах локализации микроплазменных разрядов образуется плазма с высокой концентрацией заряженных частиц (~1020 см−3) и электронной температурой ~1 эВ [2]. Возникающее при этом высокое давление (порядка 107 Па) плазмы, газа и паров, нагретых до температуры в несколько тысяч градусов, над расплавленной поверхностью металла приводит к возникновению микрократеров в расплаве металла. При этом возникает новая структура поверхностного слоя в виде перекрывающихся кратеров и формируется прочный микрорельеф на поверхности металла.

Исследования процессов возбуждения микроплазменных разрядов на поверхности металлических образцов проводились при воздействии импульсного потока плазмы плотностью ~1012 см−3, состоящей из ионов водорода (90−80%) и ионов углерода (10−20%), *Te* ~ 10 эВ. Использовались образцы из технического титана ВТ1 и алюминиевого сплава В95. Диэлектрическая пленка наносилась на поверхность образцов различными способами [1]. При воздействии плазменного потока на образец на границе открытой поверхности металла и диэлектрической пленки возбуждались микроплазменные разряды (рис. 1) и поверхность приобретала сплошной микрорельеф (рис. 2). При амплитуде напряжения, приложенного к образцу *φ*0 = −450 В вероятность возбуждения микроплазменных разрядов составляла величину близкую к 100%. При использовании образцов с толщинами пленок 4 мкм и более, вплоть до толщины 12 мкм, вероятность возбуждения микроплазменных разрядов снижалась с увеличением толщины диэлектрической пленки. При использовании образцов с пленками толщиной менее одного микрометра и с более тонкими диэлектрическими пленками вероятность возбуждения микроплазменных разрядов также падала от величины близкой к 100% при толщинах пленки 0.2−1 мкм до менее 0.3% при толщинах ниже 0.01 мкм (рис. 3).

|  |  |
| --- | --- |
| Инжектор++образец_чб_3 |  |
| Рис. 1. Микроплазменные разряды (слева) на границе диэлектрической пленки (темный круг на торце образца) и открытой поверхности титана. Инжектор плазмы (справа). | Рис. 2. Микрорельеф на поверхности образца Al В95, сформированный под действием микроплазменных разрядов с током 200 А и длительностью 20 мс. |
| Вероятность МПР_P(d)_5-1 |  |
| Рис. 3. Вероятность возбуждения микроплазменных разрядов на образцах из титана с нанесенной диэлектрической пленкой различной толщины (*φ*0 = −450 В). | Рис. 4. Эквипотенциальные линии вблизи среза пленки и профиль потенциала пленки относительно металла *δφ* в установившемся режиме (*φ*0 = −40*Te*/*e*, *d* = *rD*/25, *ε* = 2). Разность потенциалов между линиями Δ*φ* = 2*Te*/*e*. |

Определяющим фактором взаимодействия плазмы с твердым телом, является электрическое поле, возникающее вблизи поверхности тела в слое толщиной порядка дебаевского радиуса *rD* = (*Te*/4*πe*2*ne*)1/2, где *Te* – электронная температура плазмы, *ne* – плотность электронов, *e* – заряд электрона. В наших условиях дебаевский радиус составляет около 20 мкм, и электрическое поле ~ 10 кВ/см. Приложение большого (по сравнению с электронной температурой) отрицательного (относительно плазмы) электрического потенциала *φ*0 к металлической поверхности качественно не меняет ситуацию, т.к. толщина дебаевского слоя возрастает с ростом напряжения, и напряженность поля на металле растет медленно с ростом напряжения, *E* ~ |*φ*0|1/4. При напряжении на металле = −400 В напряженность поля на поверхности металла возрастает по сравнению с *E*\* всего лишь примерно в 4 раза, т.е. до 40 кВ/см. Ситуация принципиально изменяется при наличии тонкой (*d* << *rD*) диэлектрической пленки на металле. В этом случае поток положительных ионов из плазмы приводит к зарядке внешней поверхности пленки, и потенциал поверхности пленки становится плавающим *φ*f, (в наших экспериментах этот потенциал близок к нулевому), и практически все напряжение между плазмой и металлом оказывается приложенным к тонкой диэлектрической пленке *d =* 1мкм, напряженность поля внутри которой *E* ≈ |*φ*0|/*d*. Для *φ*0 = −400 В оценка величины поля составит *E* ≈ 4 МВ/см, что близко к значению, необходимому для электрического пробоя даже в объеме диэлектрика. Для более толстых пленок *d >* 4 мкм напряженность поля внутри диэлектрика оказывается недостаточной для объемного пробоя, но может превышать напряженность, необходимую для поверхностного пробоя (*E*S = 50−300 кВ/см). На краю пленки, в трещинах или разрывах это электрическое поле выходит на поверхность диэлектрика, и возникает поверхностный электрический пробой на границе между открытой поверхностью металла и заряженной поверхностью диэлектрической пленкой. В результате пробоя на краю пленки образуется сгусток плотной плазмы с *ne* ~ 1020 см−3, *Te* ~ 1 эВ и дебаевским радиусом *rD* ~ 10−7 см [2]. Электрическое поле в области контакта этой плазмы c поверхностью металла будет *E* ~ *Te*/*erD* ~ 10 МВ/см, что приводит к развитию взрывной эмиссии с образованием микродугового разряда на краю пленки на металле, т.е. к возбуждению микроплазменного разряда.

При моделировании использовали модифицированный PIC-метод, основанный на том, что время пролета ионов через дебаевский слой на несколько порядков меньше характерного времени зарядки пленки. В этом случае в процессе зарядки пленки на каждом шаге по времени движение ионов можно считать установившимся, а поток ионов можно представить в виде совокупности заряженных “струй”, распространяющихся в “стационарном” электростатическом поле. Такой подход может быть назван методом “струй в ячейке” (jet-in-cell) [1].

На рис. 4 показана структура электрического потенциала непосредственно вблизи края пленки на стадии насыщения зарядки (*t* = 1.5 мкс для экспериментальных условий) для прямоугольного среза края пленки. При наклонном (угол 45°) срезе пленки электрическое поле оказывается примерно в полтора раза меньше, чем на прямоугольном. Максимальное напряжение, до которого заряжается крайняя точка внешней поверхности пленки, составляет примерно половину напряжения металла *δφ*max/|*φ*0| ≈ 1/2

Из рис. 3, 5 видно, что при *φ*0 = −450 В и толщинах пленки в диапазоне *d* = 1−2 мкм микроплазменные разряды возбуждаются с вероятностью близкой к 100%. При увеличении или уменьшении толщины пленки вероятность возбуждения микроплазменных разрядов быстро уменьшается. При *φ*0 = −450 В максимальная разность потенциалов на срезе пленки *δφ*max ≈ |*φ*0|/2 ≈ 200 В. Соответственно, критическое значение напряженности электрического поля, при котором вероятность возбуждения падает в два раза, *E*кр ≈ (200 В)/(4 мкм) ≈ 500 кВ/см. При *d* = 12 мкм напряженность поля оказывается существенно меньше критической (*E* ≈ 170 кВ/см), и микроплазменные разряды практически не возбуждаются. При *d* << 0.2 мкм вероятность возбуждения микроплазменных разрядов существенно уменьшается за счет увеличения электропроводимости очень тонких пленок.

|  |  |
| --- | --- |
| Вероятность МПР_P(U)_5_final-1 |  |
| Рис. 5. Вероятность возбуждения микроплазменных разрядов на поверхности титана с оксидной пленкой *d* = 1 мкм в зависимости от амплитуды импульса электрического напряжения, подаваемого на образец. | Рис. 6. Зависимости относительной интенсивности изнашивания (*I*) от давления (МПа), прикладываемого к Al образцам: 1 − в исходном состоянии; 2 − в результате микроплазменного упрочнения в режиме Нmax = 4.5 мкм, 3 − в режиме Нmax = 16 мкм. |

Явление микроплазменного разряда на поверхности металлов в потоке плазмы имеет широкие перспективы в области создания особо прочных композитных материалов и износостойких сильно нагруженных деталей машин (рис. 6), которые могут найти применение в промышленности, а также в ортопедии и стоматологии, т.к. в результате взаимодействия микроплазменных разрядов с металлами происходит существенное повышение микротвердости и износостойкости поверхностных слоев металлов и сплавов, обусловленное формированием прочного микрорельефа [3].

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 13-08-01174.

Литература

1. В. А. Иванов, А. С. Сахаров, М. Е. Коныжев. *Успехи прикладной физики*, 2013. Т.1, №6. С. 697-711.

2. Ivanov V. A., Jüttner B., Pursch H. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1985. V. **13**. P. 334.

3. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuksenova et al., *Plasma Physics Reports*, 2011, V. **37**, No. 13. Pp. 1230–1235.