

05

## Разрушение металлических микрообразцов в сильном электростатическом поле

© С.В. Зайцев

ФГУП ГНЦ „Институт теоретической и экспериментальной физики“,  
Москва  
E-mail: zai336@mail.ru

Поступило в Редакцию 29 июля 2003 г.

Произведена оценка величины механических напряжений, возникающих в проводниках под действием электрического поля высокой напряженности. Показана необходимость учета сил взаимного расталкивания зарядов, находящихся на поверхности для нахождения опасного сечения.

В проводниках, находящихся в электрическом поле, возникают механические напряжения. Они могут достигать предела прочности и быть причиной разрушения и нежелательных электрических разрядов (пробоев) [1]. Поэтому важно уметь оценивать их возможную величину.

В настоящее время обычной практикой стало оценивать величину механических напряжений на основе использования выражения для „отрицательного электростатического давления“  $\sigma = \epsilon_0 E^2 / 2$  [2] (где  $E$  — напряженность электростатического поля в выбранной точке у поверхности проводника;  $\sigma$  — отрицательное давление).

Неоднократно различные авторы применяли нагружение электрическим полем для оценки величины разрушающего напряжения микрообразцов [3–7]. В этих работах образцы представляли собой микроострия, расположенные в вакууме на расстоянии нескольких сантиметров от плоского экрана перпендикулярно к нему. К образцу — микроострию прикладывали положительный электрический потенциал такой величины, что оно разрушалось „пондеромоторными“ силами. Механические напряжения в выбранном сечении образцов определялись путем суммирования сил, найденных с помощью вышеприведенной формулы на основе методики, описанной в [8]. Полученные результаты качественно

соответствуют имеющимся представлениям и прогнозам относительно прочности металлов в диапазоне диаметров образцов 50–100 nm [9].

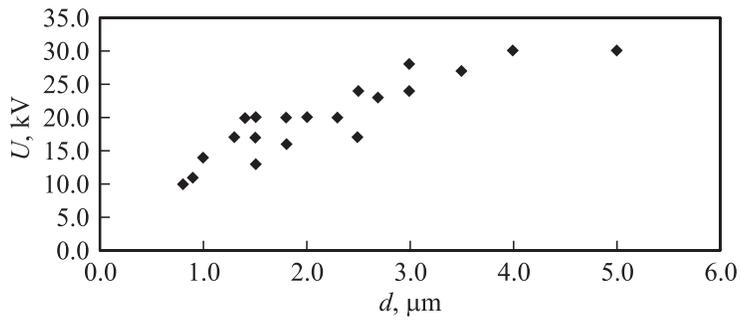
Однако правомерность такого подхода можно подвергнуть сомнению по следующей причине.

Автором проведены эксперименты по разрушению в электростатическом поле микроострий, изготовленных по методике [10] с диаметром при вершине  $50 \div 100$  nm из вольфрама, молибдена, нержавеющей стали. Образцы нагружались электрическим полем по линейному закону с различной скоростью ( $10^2$ – $10^4$  V/s) при температурах ( $300 \div 78$  K). Во всех случаях образцы перед экспериментом выдерживали при напряжении 5 kV до полного прекращения процессов испарения полем. Этим достигалось получение микроострий с одинаковыми исходными радиусами при вершине. С целью предотвращения электрического разряда в момент разрушения образца последовательно с ним включалось сопротивление  $10^{11}$   $\Omega$ . Момент разрушения регистрировался по характерному изменению изображения.

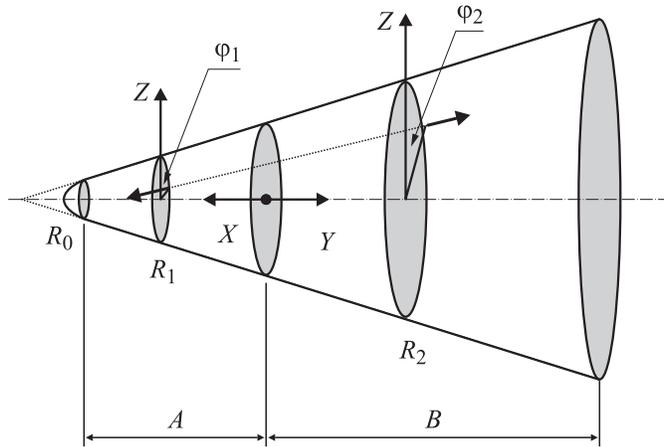
Полученные результаты в основном согласуются с результатами предыдущих работ, если считать конечным диаметром диаметр при вершине образца в момент, непосредственно предшествующий разрушению. Однако изучение после испытания образцов в растровом электронном микроскопе показывает, что разрушение происходит в подавляющем большинстве случаев вдали от вершины микроострия по сечению, где механические напряжения, вычисленные по используемым ранее методикам расчета, на 3–5 порядков ниже, чем экспериментально определенная прочность в данном сечении (для данного сечения прочность определялась путем разрушения образцов при электрополировке центральной части микропроволоки с подвешенным к ней грузиком). Зависимость между электрическим напряжением разрушения  $U$  и конечным диаметром  $d$  при вершине микроострия показана на рис. 1.

Предположение о том, что в данном случае резко снижается прочность под действием электрического поля, вряд ли может быть принято, так как во-первых, эффект слишком велик, а во-вторых, трудно объяснить, почему он не сказывается непосредственно у вершины микроострия, где напряженность электрического поля выше, и так катастрофически проявляется на расстоянии в несколько микрон от него.

Выявленное несоответствие позволило предположить, что для оценки величины механических напряжений вдали от вершины микроострия



**Рис. 1.** Зависимость электрическое напряжение разрушения — конечный диаметр при вершине микроострия.



**Рис. 2.** Расчетная схема для вычисления механических напряжений в выбранном сечении микроострия.

необходимо учитывать взаимное расталкивание электрических зарядов, скопившихся на его поверхности. Сделаем простую оценку. Расчетная схема представлена на рис. 2. Сечение, в котором определяется растягивающее механическое напряжение, находится на расстоянии  $A$  от вершины микроострия. Оси  $X$  и  $Y$  направлены от него в

разные стороны. Общая длина микроострия равна  $A + B$ . В первом приближении плотность заряда  $\chi$  на боковой поверхности микроострия может быть оценена как для цилиндрического конденсатора:

$$\chi = \varepsilon_0 U / R \ln(b/R),$$

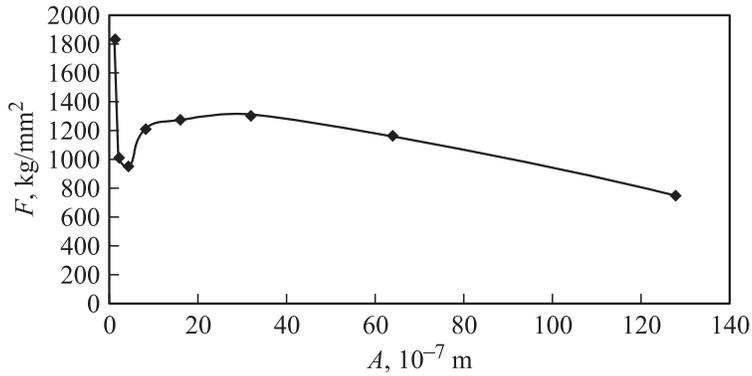
где  $b$  — расстояние до внешних электродов ( $\approx 3$  см);  $R$  — текущий радиус образца;  $U$  — электрическое напряжение.

Плотность заряда на закругленной вершине можно определить по формуле:  $\chi = \varepsilon_0 U / (kR_0)$ , где коэффициент  $k$  принимает значения  $5 \div 10$ . Данное приближение для распределения напряженности электрического поля по поверхности незначительно отличается от случаев, когда для расчета электрического поля микроострие представляют параболоидом или гиперболоидом [8]. Просуммировав силы взаимного расталкивания зарядов  $\chi_1 R_1 d\varphi_1 dx$  и  $\chi_2 R_2 d\varphi_2 dy$ , расположенных по разные стороны от выбранного сечения микроострия, можно оценить суммарную силу  $F$ , действующую в данном сечении по формуле:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \times \int_{x=\lambda}^A \int_{y=\lambda}^B \int_{\varphi_1=0}^{2\pi} \int_{\varphi_2=0}^{2\pi} \frac{\chi_1 \chi_2 R_1 R_2 (x+y) d\varphi_1 d\varphi_2 dx dy}{\{(x+y)^2 + (R_1 \cos(\varphi_1) - R_2 \cos(\varphi_2))^2 + (R_1 \sin(\varphi_1) - R_2 \sin(\varphi_2))^2\}^{3/2}},$$

где  $\alpha$  — половина угла конусности микроострия;  $R_1 = R_0 + (A - x) \operatorname{tg} \alpha$ ;  $R_2 = R_0 + (A + y) \operatorname{tg} \alpha$ ;  $\varphi_1, \varphi_2$  — углы, отсчитываемые от оси  $Z$  в плоскостях, перпендикулярных оси  $x$ .

В данном случае предел интегрирования  $\lambda$  не может быть нулем (в противном случае интеграл расходится). Можно предположить, что  $\lambda$  по порядку величины должен соответствовать расстоянию между ионными остовами, выступающими над поверхностью. Численный расчет по этой формуле (методом Монте-Карло) дает результаты, согласующиеся по порядку величины с экспериментом и очень слабо зависящие от величины  $\lambda$  (рис. 3). Видно, что вдали от вершины возникает локальный максимум механических напряжений. Если мы учтем эффект резкого повышения прочности (более чем в 10 раз) с уменьшением диаметра в область менее микрона, то становится



**Рис. 3.** Зависимость растягивающего механического напряжения в выбранном сечении от расстояния до вершины микроострия.

понятным, почему микроострие разрушается вдали от вершины. В точке локального максимума (или вблизи от него) механическое напряжение достигает величины предела прочности, соответствующего данному диаметру. В областях, более близких к вершине, напряжение может быть и выше, например, в 5 раз, но зато прочность там выше в 6 раз. Поэтому там разрушения не происходит.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что механические напряжения, возникающие внутри заряженного тела, необходимо рассчитывать путем суммирования сил взаимодействий всех электрических зарядов. (Этот вывод относится не только к проводникам). В пользу этого заключения говорит и следующий мысленный эксперимент. Если тонкая проволока является одним из электродов длинного (возможно, соединенного в тор) цилиндрического конденсатора, то расчет по формуле  $\sigma = \varepsilon_0 E^2 / 2$  приводит к нулевому осевому механическому напряжению, что, очевидно, неверно. По-видимому, эту формулу разумно применять для расчета полной силы, действующей на весь объект, но не для расчета механических напряжений внутри самого этого объекта.

Разумеется, данный вывод нуждается в дальнейшей проверке. Однако в случае его подтверждения он должен иметь важное значение для разработки конструкций (особенно в нанотехнологии), функциони-

рующих в высоких электрических полях, а также для более полного понимания микромеханизмов электрических разрядов, связанных с отрывом микрочастиц от поверхностей электродов.

## Список литературы

- [1] *Сливков И.Н.* Процессы при высоких напряжениях в вакууме. М.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
- [2] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 620 с.
- [3] *Гарбер Р.И., Дранова Ж.И., Михайловский И.М.* // ДАН СССР. 1967. Т. 174. С. 1044–1047.
- [4] *Суворов А.Л., Кукавадзе Г.М.* // ФММ. 1969. Т. 28. № 1. С. 238–241.
- [5] *Гарбер Р.И., Дранова Ж.И., Михайловский И.М.* // ФММ. 1970. Т. 30. № 2. С. 445–450.
- [6] *Михайловский И.М., Полтинин П.Я., Федорова Л.И.* // ФТТ. 1981. Т. 23. № 5. С. 1291–1295.
- [7] *Зайцев С.В., Суворов А.Л.* Характер разрушения металлов в сильных электрических полях. Препринт ИТЭФ № 154. 1987.
- [8] *Eaton H.C., Bayusick R.J.* // Surf. Sci. 1978. V. 70. N 1. P. 408–426.
- [9] *Журков С.Н.* // ФТТ. 1980. Т. 22. № 11. С. 3344–3349.
- [10] *Зайцев С.В., Карпов А.В.* // Приборы и техника эксперимента. 2000. № 4. С. 144–147.