

Исследование структуры и свойств Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of research and monitoring**

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-23-28

ДИАГНОСТИКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНО ЗАРЯЖЕННЫХ МИКРОЧАСТИЦ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ИХ РАЗРУШЕНИИ

© **Дмитрий Анатольевич Голенцов, Александр Георгиевич Гулин,
Владимир Абрамович Лихтер, Константин Евгеньевич Улыбышев**

Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова, Москва, Россия;
e-mail: ulibyshevkonstantin@yandex.ru

Статья поступила 29 ноября 2017 г.

Процесс разрушения тел сопровождается образованием не только крупных фрагментов, но и множества микроскопических осколков. Многочисленные эксперименты по разрыву образцов из различных материалов показывают, что эти осколки несут положительный электрический заряд. Данное явление представляет значительный интерес с точки зрения его использования для бесконтактной диагностики начинающегося разрушения элементов различных технических устройств. Однако отсутствие понимания физической природы явления ограничивает возможность его практического применения. Экспериментальные исследования проводили с использованием установки, позволяющей напрямую измерять суммарный заряд микрочастиц, образующихся при разрыве металлического образца, а также определять их размер и количество. В результате экспериментов по разрыву образцов из дюралюминия и электротехнической стали установили, что размер микрочастиц составляет несколько десятков микрометров, приходящийся на одну частицу заряд — порядка 10^{-14} Кл, а их количество можно оценить как отношение площади поперечного сечения образца в месте разрыва к квадрату размера микрочастицы. На основании полученных данных и современных представлений о свойствах электронного газа в металлах предложена приближенная физико-математическая модель образования положительного заряда на отколовшейся металлической микрочастице. Модель дает возможность определить заряд образующейся микрочастицы, если известны ее размеры, а также механические и электрические свойства материала. Модельные оценки суммарного заряда частиц по порядку величины совпадают с экспериментальными данными.

Ключевые слова: электростатическая диагностика; разрушение тел; микрочастицы; электризация; электронный газ в металлах; двойной электрический слой.

DIAGNOSTICS OF METAL SAMPLES USING THE RESULTS OF EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF POSITIVELY CHARGED MICROPARTICLES FORMED UPON SAMPLE DESTRUCTION

© **Dmitry A. Golentsov, Aleksandr G. Gulin,
Vladimir A. Likhter, Konstantin E. Ulybyshev**

Central Institute of Aviation Motors (CIAM), Moscow, Russia; e-mail: ulibyshevkonstantin@yandex.ru

Submitted November 29, 2017.

Destruction of bodies is accompanied by formation of both large and microscopic fragments. Numerous experiments on the rupture of different samples show that those fragments carry a positive electric charge. This phenomenon is of interest from the viewpoint of its potential application to contactless diagnostics of the early stage of destruction of the elements in various technical devices. However, the lack of understanding the nature of this phenomenon restricts the possibility of its practical applica-

tions. Experimental studies were carried out using an apparatus that allowed direct measurements of the total charge of the microparticles formed upon sample rupture and determination of their size and quantity. The results of rupture tests of duralumin and electrical steel showed that the size of microparticles is several tens of microns, the particle charge per particle is on the order of 10^{-14} C, and their amount can be estimated as the ratio of the cross-sectional area of the sample at the point of discontinuity to the square of the microparticle size. A model of charge formation on the microparticles is developed proceeding from the experimental data and current concept of the electron gas in metals. The model makes it possible to determine the charge of the microparticle using data on the particle size and mechanical and electrical properties of the material. Model estimates of the total charge of particles show order-of-magnitude agreement with the experimental data.

Keywords: electrostatic diagnostics; body destruction; micro-particles; electric charging; electron gas in metals; double electric layer.

Знание процесса электризации металлических тел при разрушении необходимо при диагностике дефектных элементов различных технических устройств.

Известно, что реактивная струя авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) имеет положительный заряд, возникающий в результате диффузии электронов в металлические элементы ГТД при их обтекании продуктами сгорания, представляющими собой слабоионизованную квазинейтральную плазму. При этом истечение заряда происходит непрерывно и равномерно, а наблюдаемые небольшие пульсации обусловлены турбулентным характером течения.

Вместе с тем иногда электрические зонды фиксируют дискретные всплески от пролета дополнительных сгустков положительного заряда [1–3]. Было установлено, что вероятность их формирования зависит от технического состояния двигателя, увеличиваясь с ухудшением последнего. Предположили, что источник положительно заряженных частиц в регистрируемых сгустках — начинающееся разрушение тех или иных элементов ГТД.

Проведенные эксперименты показали, что при разрыве металлических образцов наряду с несколькими крупными фрагментами образуется большое число микроскопических осколков, несущих положительный заряд.

Цель работы — исследование микрочастиц, образующихся при разрушении металлических образцов, включая размеры, количество и суммарный электрический заряд, а также разработка приближенной физико-математической модели их электризации.

На экспериментальной установке (рис. 1) исследовали процесс разрыва образцов из дюралюминия, стали и композитных материалов и образования заряженных микрочастиц. На рис. 2 представлены разрушаемый образец из электротехнической стали толщиной 0,5 и шириной наиболее узкого места 15 мм и вид электрического сигнала с металлической микросетки.

Суммарный электрический заряд частиц определяется формулой:

$$Q = \frac{1}{kR} \int U dt, \quad (1)$$

где U — регистрируемый электрический сигнал; t — время; R — выходное сопротивление; k — коэффициент усиления. В нашем случае $R = 1$ МОм, $k = 100$, откуда для приведенного на рис. 2 сигнала $Q = 2,48 \cdot 10^{-10}$ Кл.

Для образцов из электротехнической стали провели девять испытаний на разрыв. Минимальное, максимальное и среднее значения заряда частиц, а также среднеквадратичное отклонение составили, $\times 10^{-10}$ Кл: $Q_{\min} = 1,1$, $Q_{\max} = 4,87$, $Q_{\text{mean}} = 2,2$, $\sigma_Q = 1,14$. Разброс можно объяснить вероятностным характером процесса разрушения, зависящим от случайного распределения затравочных микротрещин.

Для сбора образующихся микрочастиц использовали также бумажный фильтр, установленный на пути всасывающего потока воздуха (диаметр — 4 см).

На рис. 3 приведен произвольный участок фильтра (вид под микроскопом). Средний размер

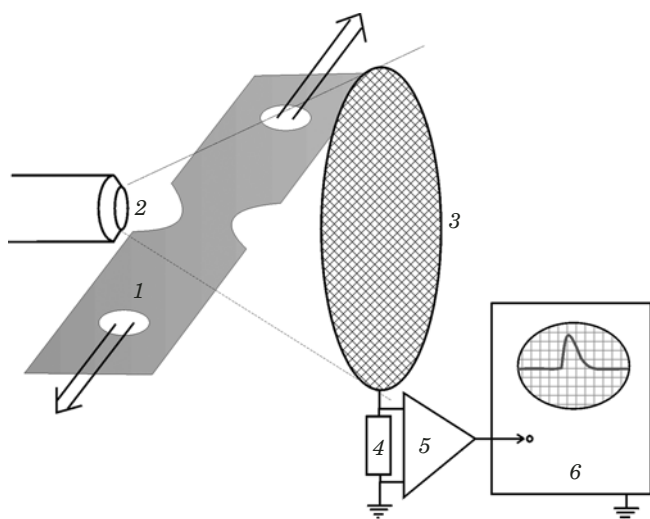


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — разрываемый образец; 2 — газодинамический поток; 3 — металлическая сетка; 4 — выходное сопротивление; 5 — усилитель; 6 — регистрирующая аппаратура

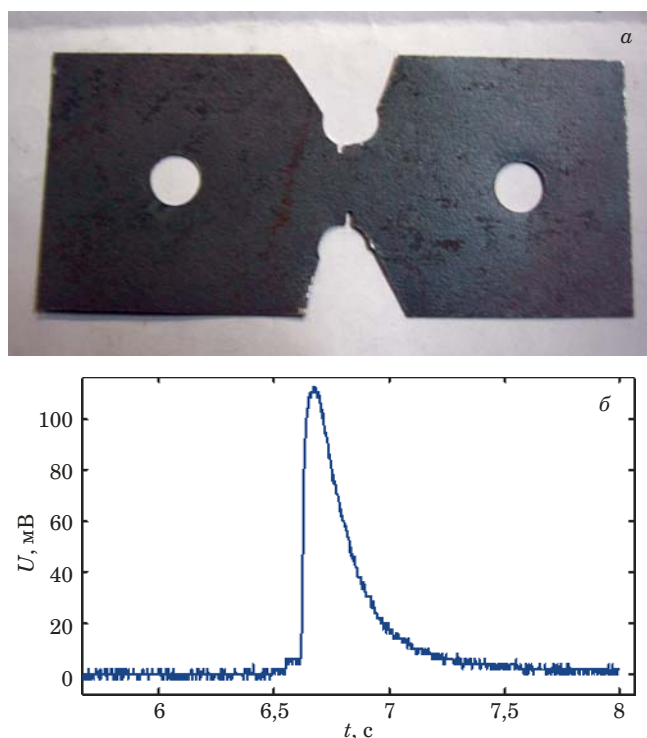


Рис. 2. Разрываемый образец (а) и электрический сигнал с металлической микросетки (б)

наблюдаемых микрочастиц составил ~ 50 мкм, плотность — ~ 10 частиц на 1 мм^2 . Следовательно, с учетом диаметра фильтра суммарное количество образующихся при разрушении микрочастиц равно $\sim 10\,000$ (по порядку величины совпадает с отношением площади поверхности скола к площади поперечного сечения микрочастицы).

Размер микрочастицы из соображений подобия и размерности должен определяться характерным масштабом неоднородности материала, который в случае поликристаллических тел соответствует размеру зерна. Иными словами, количество образующихся при разрушении тела микрочастиц

$$N \sim S/D_g^2, \quad (2)$$

где S — площадь поперечного сечения наиболее узкой части образца; D_g — размер зерна.

Отметим, что электротехническая сталь — достаточно хрупкий материал. При вязком разрушении, сопровождающемся значительными пластическими деформациями, частиц образуется существенно меньше и оценка (2) некорректна.

Электризация микрочастиц, образующихся при разрушении металлических тел, происходит в результате перераспределения электрического заряда между различными частями одного и того же образца. Последнее обстоятельство отличает данное явление от хорошо изученного процесса контактной электризации разнородных тел. В качестве возможных причин нарушения электриче-

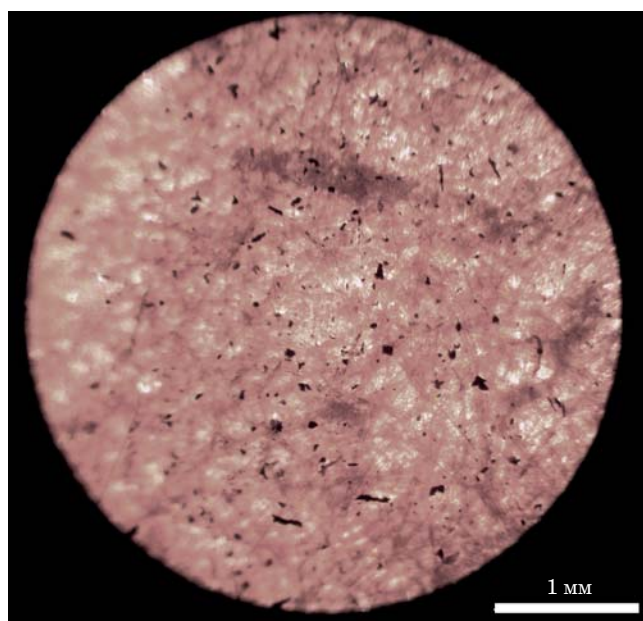


Рис. 3. Микрочастицы металла под микроскопом

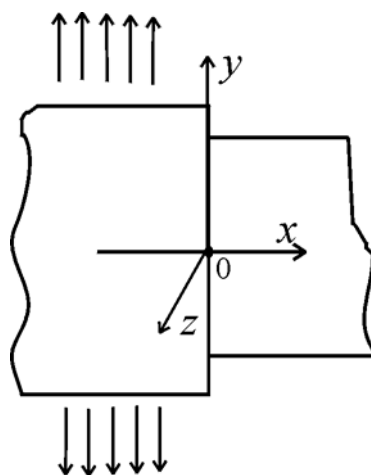


Рис. 4. Одномерная модель контакта микрочастицы с деформированным телом

ской нейтральности частей разрушаемого объекта можно предположить различную степень их деформации.

Пусть отколовшаяся микрочастица, в которой отсутствуют механические напряжения, находится в вершине трещины и контактирует с растянутым материалом. Схема одномерной модели контакта частицы с деформированным телом приведена на рис. 4. В полупространстве $x < 0$ тело подвергнуто равномерному одноосному растяжению (в направлении оси y), в $x > 0$ деформации отсутствуют.

Металлическое тело можно представить в виде кристаллической решетки положительно заряженных ионов, заполненной газом свободных электронов. Вследствие изменения объема тела

при растяжении меняются концентрации положительных ионов и (из-за сохранения суммарного заряда) свободных электронов, что в свою очередь определяет разность давлений электронного газа в деформированной и недеформированной частях образца и, соответственно, стремление электронов перетечь из одной области в другую. Перетекание ограничивается формированием на границе раздела двойного электрического слоя, в котором положительный заряд сосредоточен в недеформированной части, отрицательный — в растянутой, а суммарный заряд равен нулю.

При комнатной температуре электронный газ в металлах представляет собой так называемый вырожденный ферми-газ, свойства которого существенно отличаются от классического идеального газа. Зависимость давления вырожденного электронного газа p от концентрации электронов n определяется соотношением [4]

$$p = \frac{1}{5} (3\pi^2)^{2/3} \frac{\hbar^2}{m} n^{5/3}, \quad (3)$$

где $\hbar$ — постоянная Планка; m — масса электрона.

Уравнение равновесия электронного газа во внешнем электрическом поле:

$$-\nabla p + en\nabla\varphi = 0, \quad (4)$$

где e — заряд электрона; φ — электрический потенциал.

Подставляя (3) в (4) и проводя несложные преобразования, получим

$$\nabla(E_f - e\varphi) = 0, \quad E_f = (3\pi^2)^{2/3} \frac{\hbar^2}{2m} n^{2/3}, \quad (5)$$

где E_f — энергия Ферми.

Проинтегрировав (5), имеем

$$E_f - e\varphi = \mu = \text{const}, \quad (6)$$

где μ — электрохимический потенциал [5].

Для нахождения электрического потенциала использовали уравнение Пуассона:

$$\Delta\varphi = \frac{e}{\varepsilon_0} (n - Zn_i), \quad (7)$$

где n_i — концентрация положительных ионов, определяемая из соответствующего заданной деформации удельного объема рассматриваемой части тела; Z — заряд иона.

Уравнения (6) и (7) позволяют найти концентрацию электронов при заданной концентрации ионов.

Равновесные концентрации электронов и ионов в растянутом образце вдали от границы

раздела оценивали в приближении одноосной деформации, достигающей предельных значений, при которых начинается разрушение. В этом случае изменение объема тела определяется уравнением

$$\frac{dV}{V} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = \frac{\sigma_B}{E} (1 - 2\nu), \quad (8)$$

где σ_B — предел прочности на разрыв; E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; ε_{ik} — компоненты тензора упругих деформаций.

Механические характеристики электротехнической стали принимали следующими: $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $\sigma_B = 4 \cdot 10^8$ Па, $\nu = 0,3$ [6]. Отсюда $dV/V < 10^{-3}$. Видно, что изменения концентраций электронов и ионов по сравнению с начальными (невозмущенными) величинами малы.

Обозначив $n = n_0 + n^{(1)}$, $n_i = n_i^{(0)} + n_i^{(1)}$, где $n_0 = Zn_i^{(0)}$, и подставив их в (6) – (7), получим линейризованную систему уравнений относительно возмущенных значений концентраций заряженных частиц и потенциала:

$$\frac{2}{3} (3\pi^2)^{2/3} \frac{\hbar^2}{2m} n_0^{-1/3} n^{(1)} - e\varphi = \text{const}, \quad (9)$$

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{e}{\varepsilon_0} (n^{(1)} - Zn_i^{(1)}). \quad (10)$$

В соответствии с (8) возмущенные значения концентрации ионов в деформированном и недеформированном телах определяются выражением:

$$\begin{aligned} x < 0; \quad n_i^{(1)} &= -\frac{n_0}{Z} \frac{\sigma_B}{E} (1 - 2\nu); \\ x > 0; \quad n_i^{(1)} &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Полагая потенциал разрушаемого образца равным нулю, получим решение системы (9) – (10):

$$\begin{aligned} x > 0; \quad \varphi &= \varphi_0 (1 - 0,5e^{-\alpha x}); \\ x < 0; \quad \varphi &= 0,5\varphi_0 e^{\alpha x}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $\alpha = 1/r_d$,

$$r_d = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\varepsilon_0 E_f}{e^2 n_0}}, \quad \varphi_0 = \frac{2}{3} \frac{E_f}{e} \frac{\sigma_B}{E} (1 - 2\nu). \quad (13)$$

Величина r_d с точностью до постоянного множителя равна радиусу экранирования Томаса – Ферми — величине, аналогичной дебаевскому радиусу для классической плазмы (расстоянию, на котором затухает электрическое поле от внесенного в металл заряда). Величину E_f опре-

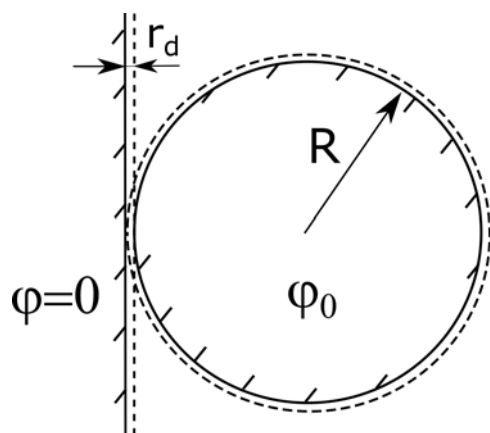


Рис. 5. Модель контакта частицы с плоской поверхностью деформированного тела в одной точке

деляем по невозмущенной концентрации электронов, которую находим из соотношения

$$n_0 = ZN_A \rho / M, \quad (14)$$

где ρ — плотность; M — молярная масса.

Предполагая, что на каждый атом железа приходится по три свободных электрона, получаем, что $n_0 \sim 2,5 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$. Отсюда $\phi_0 = 0,0085 \text{ В}$, $r_d = 4,615 \cdot 10^{-11} \text{ м}$.

Поверхностная плотность заряда при $x > 0$ определяется выражением:

$$q_w = \frac{1}{2} e n_0 r_d \frac{\sigma_B}{E} (1 - 2\nu). \quad (15)$$

Для принятых механических характеристик стали $q_w = 8,12 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/м}^2$.

Если предположить, что плотность заряда равномерно распределена по поверхности частицы, то заряд одной частицы радиуса $R = 25 \text{ мкм}$ составит примерно $6 \cdot 10^{-12}$, а суммарный заряд всех частиц — $6 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$, что более чем на два порядка превышает наблюдаемые в экспериментах значения. Расхождение объясняется тем, что в реальности отколовшаяся микрочастица не может контактировать с деформированным телом всей своей поверхностью.

Далее исследовали модель контакта сферической частицы с плоской поверхностью деформированного тела в одной точке (рис. 5).

Потенциал частицы ϕ_0 (выражение (13)), определяемый из условия постоянства электрохимического потенциала (6), не зависит ни от ее формы, ни от площади поверхности контакта. Единственное условие применимости формулы (6) — наличие термодинамического равновесия между электронными газами тела и частицы, для чего необходимо, чтобы расстояние между телом и частицей было не слишком большим по сравнению с r_d .

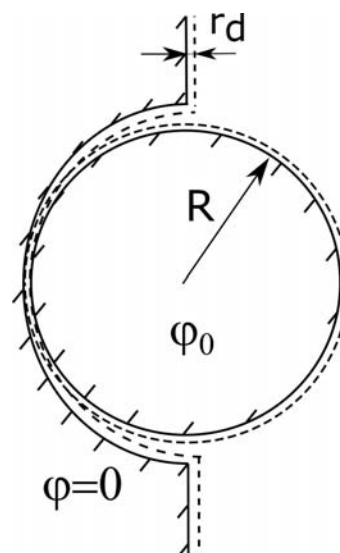


Рис. 6. Модель контакта отколовшейся частицы с разрываемым образцом по криволинейной поверхности

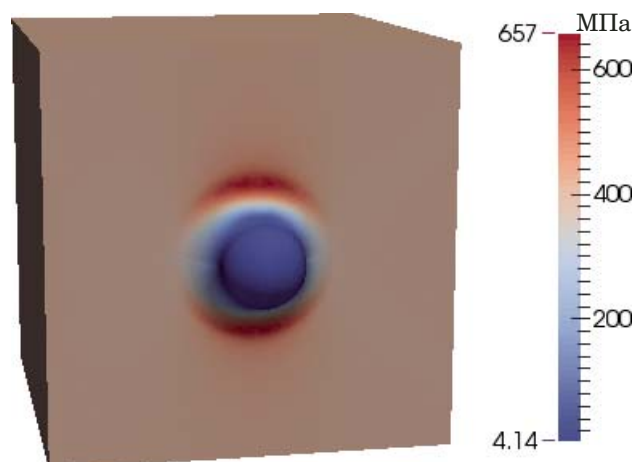


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений в окрестности неровности поверхности растягиваемого образца до стадии отрыва

Таким образом, определение заряда частицы сводится к электростатической задаче нахождения заряда проводящей сферы заданного потенциала, расположенной вблизи заземленной плоскости.

Расстояние между частицей и плоскостью примем равным r_d . Тогда емкость сферы определяется выражением [7, 8]

$$C = 4\pi\epsilon_0 R \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sh}[\ln(D + \sqrt{D^2 - 1})]}{\text{sh}[n \ln(D + \sqrt{D^2 - 1})]}, \quad (16)$$

где $D = (R + r_d)/R$.

При $r_d \ll R$

$$C = 4\pi\epsilon_0 R \left(\frac{1}{2} \ln 2 + 0,58 - \frac{1}{2} \ln \frac{r_d}{R} \right). \quad (17)$$

При $R = 25$ мкм и $r_d = 4,615 \cdot 10^{-11}$ м $C = 2,08 \cdot 10^{-14}$ Ф, а заряд одной частицы $Q_0 = C\varphi_0 = 1,8 \cdot 10^{-16}$ Кл. Суммарный заряд частиц, количество которых оценили как 10^4 , составляет $1,8 \cdot 10^{-12}$ Кл, что на два порядка меньше экспериментальных значений.

Модель контакта частицы с разрываемым образцом по некоторой криволинейной поверхности (например, при наличии неровности в зоне разрыва) представлена на рис. 6.

Расчеты напряженно-деформированного состояния растягиваемого тела с неровной поверхностью показывают, что напряжения по периметру неровности значительно превышают средние по образцу, что может быть причиной отрыва микрочастицы (рис. 7).

Рассмотрим близкий к данной модели случай неконцентрического сферического конденсатора, в котором внутренняя сфера (отколовшаяся частица) расположена внутри сферической полости (минимальное расстояние между поверхностями сферы и полости по порядку величины равно r_d). Емкость конденсатора будет определяться выражением [9]

$$C = 4\pi\epsilon_0 R a \operatorname{sh} \beta \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{a \operatorname{sh} n\beta - R \operatorname{sh}(n-1)\beta}, \quad (18)$$

где R, a — радиусы частицы и полости; $\operatorname{ch} \beta = \frac{R^2 + a^2 - c^2}{2aR}$; $c = a - R - r_d$.

Для $a \sim R\sigma_b/E$ получим: $C = 5,3 \cdot 10^{-12}$ Ф, $Q_0 = C\varphi_0 = 4,5 \cdot 10^{-14}$ Кл, суммарный заряд частиц $Q = 4,5 \cdot 10^{-10}$ Кл. Результат находится в пределах между минимальной и максимальной величинами, наблюдаемыми в эксперименте.

Таким образом, проведенные исследования суммарного заряда, количества и размера микрочастиц, образующихся при разрушении металлических тел, показали, что предложенная на основании экспериментальных данных приближенная модель электризации микрочастиц металла удовлетворительно описывает механизм формирования положительного заряда на отколовшейся микрочастице. Определенный с ее помощью суммарный электрический заряд с точностью до

порядка величины совпадает с результатами эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ватажин А. Б., Голенцов Д. А., Лихтер В. А., Шульгин В. И. Проблема бесконтактной электростатической диагностики состояния авиационных двигателей. Теоретическое и лабораторное моделирование / Изв. РАН. МЖГ. 1997. № 2. С. 83 – 95.
2. Божков А. И., Ватажин А. Б., Голенцов Д. А., Лихтер В. А. Электрические поля, создаваемые реактивными струями авиационных двигателей. Теоретическое и лабораторное моделирование / Аэромеханика и газовая динамика. 2003. № 2. С. 49 – 59.
3. Ватажин А. Б., Улыбышев К. Е. Модель формирования электрического тока выноса в каналах авиационных реактивных двигателей / Изв. РАН. МЖГ. 2000. № 2. С. 139 – 148.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. 4. Статистическая физика. — М.: Наука, 1964. — 567 с.
5. Теория неоднородного электронного газа. / Под ред. С. Лундквиста, Н. Марча. — М.: Мир, 1987. — 400 с.
6. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др. Физические величины: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.
7. Maxwell J. C. A Treatise on Electricity and Magnetism. — Dover, 1873. — 266 p.
8. Rawlins A. D. Note on the Capacitance of Two Closely Separated Spheres / IMA Journal of Applied Mathematics. 1985. N 34(1). P. 119 – 120.
9. Smythe W. R. Static and Dynamic Electricity. — NY: McGraw-Hill, 1950.

REFERENCES

1. Vatazhin A. B., Golentsov D. A., Likhter V. A., Shul'gin V. I. Problem of contactless electrostatic aircraft engine diagnostics. Theoretical and laboratory modeling / Izv. RAN. MZhG. 1997. N 2. P. 83 – 95 [in Russian].
2. Bozhkov A. I., Vatazhin A. B., Golentsov D. A., Likhter V. A. Electric fields, produced by aircraft engine jets. Theoretical and laboratory modeling / Aeromekh. Gaz. Dinam. 2003. N 2. P. 49 – 59 [in Russian].
3. Vatazhin A. B., Ulybyshev K. E. Model of formation of the electric current in aircraft jet engine ducts / Izv. RAN. MZhG. 2000. N 2. P. 139 – 148 [in Russian].
4. Landau L. D., Lifshits E. M. Theoretical physics. Vol. 4. Statistical physics. — Moscow: Nauka, 1964. — 567 p. [in Russian].
5. Theory of the inhomogeneous electron gas / S. Lundqvist, N. March (ed.). — Moscow: Mir, 1987. — 400 p. [in Russian].
6. Babichev A. P., Babushkina N. A., Bratkovskii A. M., et al. Physical quantities: reference. — Moscow: Energoatomizdat, 1991. — 1232 p. [in Russian].
7. Maxwell J. C. A Treatise on Electricity and Magnetism. — Dover, 1873. — 266 p.
8. Rawlins A. D. Note on the Capacitance of Two Closely Separated Spheres / IMA Journal of Applied Mathematics. 1985. N 34(1). P. 119 – 120.
9. Smythe W. R. Static and Dynamic Electricity. — NY: McGraw-Hill, 1950.