

УДК 533.9

О ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ КУЛОНОВСКОГО ВЗРЫВА МЕТАЛЛА

А. А. Рухадзе, У. Юсупалиев

Обсуждаются различные механизмы кулоновского взрыва металла во внешнем электрическом поле. Показано, что в случае низкочастотного поля, когда частота поля меньше частоты столкновений электронов металла, достичь условий кулоновского взрыва металла практически невозможно. Если же частота поля больше частоты столкновений, то кулоновский взрыв металла возможен в условиях, когда энергия осцилляций электронов металла намного превосходит энергию Ферми и работу выхода. Такие условия реализуются в мощном импульсе коротковолнового (ультрафиолетового) лазерного излучения при плотностях мощности $\gtrsim 10^{17}$ Вт/см², или при напряженностях электрического поля лазерного излучения, более чем на порядок превосходящих атомное поле.

В начале июня сего года на Интернет-Сайте появилась статья [1] профессора МГТУ им. Н. Э. Баумана М. Марахтанова и аспиранта Калифорнийского Университета (г. Беркли, США) А. Марахтанова под названием "Металл взрывается". Чтобы не исказить смысл статьи, цитируем дословно. В аннотации к статье говорится: "В 1988 году журнал опубликовал статью доктора технических наук, академика Российской академии ракетно-артиллерийских наук В. В. Яворского "Энергия из ниоткуда" (см. "Наука и жизнь" N 10). В ней сообщалось, что при работе над средствами поражения брони было обнаружено крайне любопытное явление. При внедрении в стальную плиту бронебойного снаряда из твердого металла массой 4 килограмма, не снаряженного взрывчатым веществом, вокруг пробойны возникала зона цветов побежалости,

свидетельствующая о сильном нагреве. Оценка показала, что количество выделившегося тепла было в несколько раз больше кинетической энергии снаряда. КПД процесса превышал 400%! Исследования на моделях – легких ударниках и прямые измерения количества выделившегося тепла в калориметре подтвердили наличие странного явления. Превышение тепловой энергии над кинетической для модели массой 61.5 *грамма* составило 20%, массой 88.5 *грамма* – 48%: явно прослеживалась роль масштабного фактора.

Сотрудники ФИАН им. П. Н. Лебедева, к которым обратились за консультацией, объяснить происходящее не смогли, но указали, что обнаруженный дисбаланс энергий говорит о большой сложности протекающих при ударе процессов. Объяснить физическую суть явления и обнаружить новое, неизвестное ранее свойство металла сумели авторы настоящей статьи”. Далее в статье приводится ряд примеров, в которых аналогичное явление выделения тепла сверхмеханической энергии наблюдалось при падении на Землю метеоритов и при протекании достаточно большого тока в металлических пленках: ”Авторы проделали подобные опыты, пропуская ток по металлическим пленкам толщиной несколько сотен атомарных слоев. В столь тонком слое металл хорошо охлаждался воздухом и нагревался не выше 1800°С. Плотность тока j в пленках увеличивали в 1000 раз по сравнению с обычным проводом. При значениях $j = (1.43 - 8.04) \cdot 10^9 \text{ А/м}^2$ (соответственно вольфрам и алюминий) энергетическое равновесие в кристаллах нарушалось настолько, что они взрывались, минуя жидкое состояние, за несколько микросекунд. Известно, что плотность тока пропорциональна скорости потока электронов, а кинетическая энергия пропорциональна квадрату скорости. Поэтому, когда плотность тока увеличивалась в тысячу раз, кинетическая энергия направленного (локализованного) потока электронов возрастала в миллион раз. Этого оказалось достаточно, чтобы ”отвлечь” свободные электроны от роли ”клея” и взорвать кристаллическую решетку. Способ взрыва твердого металла с помощью электрической силы, а также источник энергии, основанный на этом принципе, авторы запатентовали в 2000 году.

Электрический взрыв твердого металла оказался весьма эффективным. Энергия связи каждого атома, например, железа, превращенная в энергию взрыва, составляет около $8 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$ (известное взрывчатое вещество тротил вдвое слабее). Вместе с тем эффективность взрывчатых веществ оценивается не только энергией, но и мощностью, то есть отношением энергии взрыва к его продолжительности. Благодаря кратковременности мощность взрыва металла в сотни раз больше, чем у того же тротила.

Проведенные опыты позволили наконец определить ту величину избытка кинетиче-

ской энергии свободных электронов, которая нарушает равновесие частиц в металлическом кристалле. Мы установили, что труднее всего взорвать легкий алюминий. Для этого требуется электрическая энергия $\beta = 1/66$ его энергии связи. Легче всего взрывается тяжелый вольфрам – необходимая энергия составляет только $1/2133$ энергии связи, и КПД взрыва близок к 100%, поскольку он равен $(1 - \beta) \cdot 100\%$.

Прочитав эту статью в Интернете, мы решили количественно рассмотреть различные механизмы кулоновского взрыва металла. Прежде всего отметим, что ни бронебойный снаряд, ни метеорит при ударе о мишень кулоновский взрыв металла вызвать не могут – свободные электроны металла оторваться от ионов кристаллической решетки на длину дебаевского радиуса (которая в металлах $\approx 10^{-8}$ см) не могут, не говоря уж о том, что преодолеть энергетический барьер (работу выхода) и выйти за пределы поверхности металла они не способны. Действительно, скорость бронебойного снаряда, также как и скорость метеорита, не превышает 10^6 см/с = 10^4 м/с (или 30 скоростей звука в воздухе), в то время как скорость Ферми порядка $V_{Fe} \approx 10^8$ см/с (энергия Ферми ≥ 1 эВ), а чтобы преодолеть работу выхода и покинуть металл, электроны должны получить скорость выше скорости Ферми. Таких скоростей электроны при мгновенном торможении бронебойного снаряда либо метеорита следовательно не приобретут и наблюдаемое В. В. Яровским явление (также как и подобное явление при падении метеоритов) скорее всего связано с разогревом металла и его окислением (т.е. обычным горением металла). Это явление хорошо известно и для сведения авторов мы сошлемся на недавно опубликованные работы [2, 3] (где можно найти и предшествующую литературу).

Что касается реализации кулоновского взрыва при протекании импульса тока через металлическую пленку, то приведем количественное рассмотрение такой возможности. Предположим, что длительность импульса превышает время свободного пролета электронов в металле, т.е.

$$\tau \gg \nu_e^{-1} \approx 10^{-14} \text{ с}, \quad (1)$$

где ν_e – частота упругих столкновений электрона в металле (или ν_e^{-1} – время жизни или время релаксации импульса электрона в металле). Для сильноточных источников условие (1) всегда выполняется. Отметим, что длина свободного пробега электрона в металлах, согласно оценке (1), порядка $L \approx V_{Fe}/\nu_e \approx 10^{-6}$ см. Толщину пленки обозначим через $2d$, а плотность тока – j . Скорость токового дрейфа $U = j/en_e$, где $n_e = 10^{22}$ см $^{-3}$ – плотность свободных электронов в металле. Кулоновский взрыв металла, как правильно

отмечают авторы работы [1], возможен когда электроны отрываются от ионов кристаллической решетки, причем такой отрыв должен превосходить дебаевский радиус. Как отмечалось выше, это возможно, если скорость дрейфа превышает $V > V_{Fe} = 10^8$ см/с. При этом плотность тока окажется больше, чем $j_{gr} = 10^{11}$ А/см² = 10^{15} А/м². В приведенном же в работе [1] эксперименте плотность тока на 5 порядков ниже. Поэтому нам представляется, что наблюдаемое авторами дополнительное выделение тепла не может объясняться кулоновским взрывом металла, а объясняется уже упомянутым выше окислением металла при омическом его нагреве [2, 3]. Следует напомнить, что еще в середине прошлого века при электрическом взрыве проводника (циркония) в воде экспериментально была показана возможность получения энергии большей, чем вложенной [4]. Там же дано объяснение этого явления: высокая температура плазмы металла инициирует химическую реакцию окисления в продуктах разложения воды.

При меньших же плотностях тока контакты пленки с электродами вполне могут обеспечить "поставку" электронов в металлическую пленку и никакого отрыва электронов от ионной решетки не будет.

Однако возможен другой механизм кулоновского взрыва металла при протекании тока через него. А именно, отжатие электронов от ионов магнитным полем тока (или так называемый пинч-эффект). В случае металлической пленки толщины $2d$ такой эффект будет иметь место при условии

$$n_e \epsilon_{Fe} < \frac{B_0^2(d)}{8\pi} = \frac{2\pi}{c^2} j^2 d^2. \quad (2)$$

Здесь $\epsilon_{Fe} = (3\pi^2)^{2/3} \hbar^2 n_e^{2/3} / 2m = mV_{Fe}^2/2$ – энергия Ферми: при $n_e = 10^{22}$ см⁻³ имеем $\epsilon_{Fe} \approx 1$ эВ, B_0 – магнитное поле тока. Из (2) следует, что отжатие электронов магнитным полем тока в пленке с толщиной $2d = 2 \cdot 10^{-6}$ см будет иметь место при $j > 3 \cdot 10^{11}$ А/см². Отметим здесь же, что выполнение условия (2) необходимо, но недостаточно для наблюдения кулоновского взрыва металла пленки. Для этого должны выполняться еще два следующих важных условия:

а) Длительность импульса тока должна быть больше времени проникновения тока в пленку, т.е.

$$\tau > \frac{d^2 2\pi\sigma}{c^2}, \quad (3)$$

где $\sigma = \omega_{Le}^2 / 4\pi\nu_e \approx 2 \cdot 10^{16}$ CGSE – проводимость металла пленки. Согласно (3) $\tau > 10^{-16}$ с.

б) Вместе с тем, время импульса тока должно быть меньше времени омического нагрева кристалла до температуры плавления, $T_{пл} \sim 10^3 K$, или

$$\tau < \frac{n_e \sigma T_{пл}}{j^2 \delta}, \quad (4)$$

где $\delta \approx 2m/M \approx 10^{-4}$ – доля передаваемой энергии при столкновениях электронов с ионами решетки.

Из неравенств (2) – (4) следует условие на параметры системы, когда возможно магнитное отжатие электронов и кулоновский взрыв нерасплавленного кристалла,

$$T_{пл} > \delta \epsilon_{Fe}, \quad (5)$$

что выполняется с запасом. При этом однако время импульса, согласно (4), должно быть $\tau \leq 10^{-13} c$, а полный ток даже при ширине пленки $10^{-4} cм$ составит 30 А, т.е. скорость нарастания тока должна превысить $10^{14} A/c$, что реализовать на сегодняшний день трудно, но в принципе возможно.

Значительно более подходящим представляется реализовать кулоновский взрыв металла при его облучении мощным фемтосекундным импульсом ультрафиолетового лазерного излучения. Здесь также необходимо выполнение двух условий [5]:

а) необходимо, чтобы металл был прозрачен для лазерного излучения с частотой ω_0 , т.е.

$$\omega_0 > \omega_{Le} \gg \nu_e, \quad (6)$$

где $\omega_{Le} = (4\pi e^2 n_e / m) \approx 6 \cdot 10^{15} c^{-1}$, что хорошо выполняется в ультрафиолетовой области длин волн $\lambda < 3 \cdot 10^{-5} cм \approx 3000 A$;

б) нужно, чтобы амплитуда осцилляций электрона в поле лазерного излучения превышала толщину металлической пленки

$$r_E = \frac{eE_0}{m\omega_0^2} = \frac{V_E}{\omega_0} > 2d. \quad (7)$$

Здесь E_0 – амплитуда электрического поля лазерного излучения, V_E – амплитуда скорости осцилляций электрона. При $\omega_0 \approx 10^{16} c^{-1}$ (т.е. $\lambda \approx 2000 A$) и $d \approx 10^{-6} cм$ отсюда следует, что $E_0 > 10^{11} B/cм$, или плотность мощности $P = cE_0^2/4\pi > 5 \cdot 10^{19} Вт/cм^2$. Такая плотность мощности ультрафиолетового лазерного излучения сегодня уже пре-
взойдена.

В указанных условиях поле лазерного излучения проникает в металл без ослабления, приводит электроны пучка в осцилляторное движение с амплитудой $r_E > 2d$ и поэтому электроны, обладая энергией, намного большей работы выхода, легко покидают металлическую фольгу за время $\sim 2\pi/\omega_0$. При этом кристаллическая решетка оголяется от электронов, причем из-за правого неравенства (6) разогрев металла несущественен. Отметим также, что при $E_0 \approx 10^{11}$ В/см энергия осцилляции электронов в поле лазерной волны намного превышает энергию Ферми, но все еще остается нерелятивистской, она порядка 30 кэВ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] М а р а х т а н о в М., М а р а х т а н о в А. "Металл взрывается", <http://Nauka.ru/06/02.04/06204016.htm>, 2003.
- [2] К а р т х о д ж и я В. П., М д и в и н ш в и л и М. О., Т а н т е к о ш в и л и Н. И. ЖТФ, **69**, N 4, 41 (1999).
- [3] К а р т х о д ж и я В. П., М д и в и н ш в и л и М. О., Т а н т е к о ш в и л и Н. И. Письма ЖТФ, **25**, вып. 13, 10 (1999). х
- [4] Электрический взрыв проводников, пер. с англ. под ред. Рухадзе А. А. и Шпигеля И. С., М., Мир, **1 – 2**, 1965.
- [5] R u s e k M., L o g a t e c I., and B l e n s k y T. Phys. Rev., A, **63**, 013203 (2000).

Институт общей физики
им. А. М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 1 сентября 2003 г.