

УДК 53.09:53.092:538.9:551.594.223

## ПРОЦЕСС СВЕРХГЛУБОКОГО ПРОНИКАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ В ТВЕРДОЕ ТЕЛО

© 2024 г. А. И. Никитин<sup>1,\*</sup>, В. А. Никитин<sup>1</sup>, А. М. Величко<sup>1</sup>, Т. Ф. Никитина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе  
Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН, Москва, Россия

\*E-mail: anikitin@chph.ras.ru; anikitin1938@gmail.com

Поступила в редакцию 05.06.2024 г.

После доработки 05.07.2024 г.

Принята к публикации 05.07.2024 г.

Объясняются эффекты, возникающие при столкновении с твердой мишенью потока металлических частиц размером 10–100 мкм, движущихся со скоростью 1–3 км/с. Сделано предположение, что в момент удара о мишень частица теряет часть электронов и в течение некоторого времени благодаря наличию окисной оболочки удерживает на себе положительный заряд. Поток электронов, проходящий по мишени в момент удара, генерирует импульс электромагнитного поля. Частица, обладающая зарядом  $\sim 10^{-9}$  Кл, внедрившись внутрь твердой мишени, давит на стенку канала с силой  $\sim 500$  МПа и движется в нем под действием сил, вызванных поляризацией вещества мишени. Комбинация высокого давления и смещения приводит к существенному снижению силы трения частицы о стенку. Предложенная гипотеза в случае своего подтверждения может помочь найти способы защиты электронных приборов космических аппаратов от ударов потоков быстрых пылевых частиц.

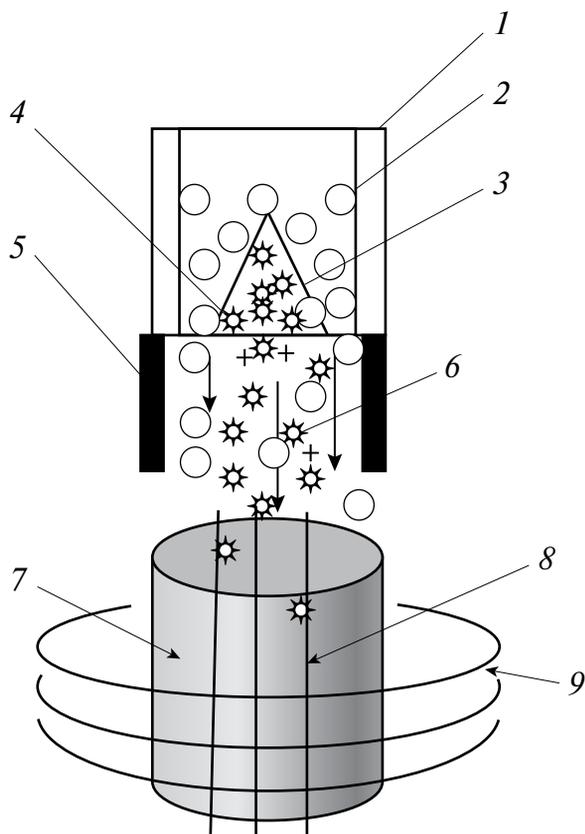
DOI: 10.31857/S0023476124050071, EDN: ZDEOYN

### ВВЕДЕНИЕ

В промышленности важную роль играют процессы с применением штамповки металлических изделий. Штамповая оснастка изнашивается неравномерно: основной износ наблюдается в областях, где происходит прогиб и затекание материала заготовки. Проблему износа можно решить двумя способами: изготовить всю штамповую оснастку из материала, способного работать в условиях интенсивного износа (как правило, для этого используется дорогой сплав вольфрама с кобальтом), изготовить сборную штамповую оснастку из материалов разной износостойкости. Это позволит уменьшить массу твердого сплава в 3–5 раз, но увеличит затраты на механическую обработку и сборку изделия. Однако исследования, проведенные Европейской ассоциацией порошковой металлургии, показали, что вольфрамо-никелевые сплавы являются канцерогенами, и их применение было ограничено. В связи с этим возникла проблема поиска методов повышения износостойкости обычных инструментальных штамповых сталей. В данном случае перспективен способ локального упрочнения стальных деталей потоком порошковых частиц твердого материала, разогнанных до больших скоростей

энергией взрыва. Уровень износостойкости штамповых сталей в 50–100 раз ниже, чем у твердых сплавов типа карбид–вольфрам–кобальт, однако ударная вязкость, предел прочности на изгиб и технологичность изготовления штамповой оснастки у них значительно выше.

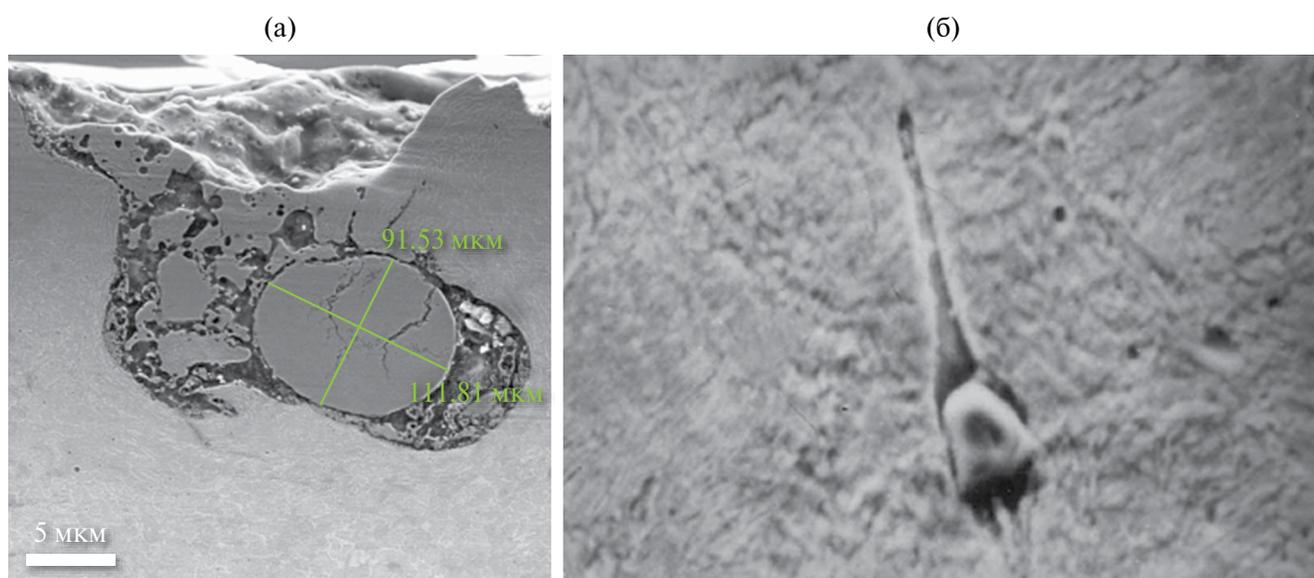
Многие годы существовало мнение, что независимо от параметров удара глубина проникания быстрой порошковой частицы в преграду не должна быть больше величины, равной шести ее размерам. В 1974 г. в Институте импульсных процессов (г. Минск) было обнаружено явление проникания частиц, движущихся со скоростью больше 500 м/с, в металлическую преграду на глубину в десятки и сотни миллиметров (эффект Ушеренко) [1]. В мишени появлялись длинномерные каналные образования, плотность которых достигала 1500 шт./мм<sup>2</sup>. При внедрении в сталь частиц карбида кремния или бориды ниобия происходило размывание вводимого материала по стенке канала. После захопывания канала образовывались волокна, состоящие из матричного и вводимого материала. Стальная деталь превращалась в композиционный материал. При обработке стали потоком частиц бориды титана (TiB<sub>2</sub>) или карбонитрида титана с



**Рис. 1.** Схема проведения опыта по исследованию действия потока микрочастиц SiC на металлическую мишень: 1 – корпус заряда, 2 – взрывчатое вещество, 3 – кумулятивная воронка, 4 – частицы порошка, 5 – регулирующая опора, 6 – поток частиц порошка и плазмы, 7 – металлический образец, 8 – силовые линии электрического поля, 9 – силовые линии магнитного поля.

никелем (TiCN + Ni) ее износостойкость увеличилась в 2 раза [2].

На рис. 1 показана схема установки для внедрения в металлическую матрицу быстрых частиц порошка [3]. Порцию частиц порошка размерами от 10 до 200 мкм и массой 20–200 г помещали в капсулу, находившуюся внутри заряда взрывчатого вещества. При инициировании взрыва частицы порошка разгонялись продуктами взрыва до скорости 1–3 км/с и ударялись в поверхность металлической преграды. В момент удара частицы ее давление на мишень достигало 15 ГПа. Расчет показал, что запас кинетической энергии сферической частицы мог позволить ей внедриться внутрь твердого тела на глубину не больше 5–6 значений ее диаметра. На рис. 2а показана такая частица [4], для получения фотографии стальная мишень была разрезана вдоль траектории частицы и отшлифована. Можно видеть, что внедрившаяся частица оставила широкий кратер, а образовавшийся канал заполнен зернами материала мишени. На рис. 2б показана частица, сумевшая внедриться в мишень на большую глубину [5, 6]. Хорошо видно, что картина радикально отличается от показанной на рис. 2а. Внедрившаяся частица на рис. 2б находится в канале, который позади нее не заполнен посторонними включениями. Этот канал сужается позади частицы и на некотором расстоянии от нее схлопывается. Давление в канале повышалось до 12 ГПа, и из кратера выбрасывались микроструктуры плотной плазмы, что сопровождалось интенсивным свечением. Глубина проникновения зависела от размера частицы (рис. 3) [5–8]. На максимальную глубину проникали частицы размером около 60 мкм, а частицы размером меньше 5 мкм и больше 200 мкм тормозились на



**Рис. 2.** Частица железа, внедрившаяся в поверхность мишени из железо-никелевого сплава (а); частица, проникшая в сталь на большую глубину (б).

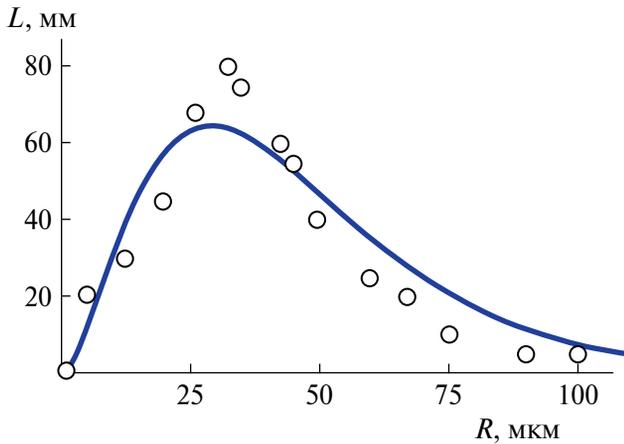


Рис. 3. Зависимость глубины  $L$  проникания быстрой частицы от ее радиуса  $R$ .

небольших глубинах. Было обнаружено, что эффект сверхглубокого проникания частиц происходит только при столкновении с преградой сгустка частиц. При столкновении с преградой одиночных частиц эффекта сверхглубокого проникания не наблюдалось. Во время взаимодействия потока микрочастиц SiC с цилиндрической мишенью из стали-10 возникал импульс электромагнитного поля [3]. Магнитное поле измеряли с помощью трехкоординатного датчика Холла, расположенного на расстоянии 15 см от мишени. Вид силовых линий магнитного поля (окружности с центром на оси цилиндра) показан на рис. 1. Время действия импульса магнитного поля –  $(5-12) \times 10^{-6}$  с, его индукция  $B = (5-80) \times 10^{-3}$  Тл. При увеличении массы заряда взрывчатого вещества от 100 до 600 г индукция выросла с 20 до 80 мТл, она была максимальной при размере частиц  $r = 60$  мкм и уменьшалась до нуля при увеличении размера до  $r = 220$  мкм.

При проведении исследований поверхность цилиндрической мишени обрачивали рентгеновской фотопленкой, завернутой в несколько слоев черной бумаги. После проявления на фотопленке обнаружены линии (треки) длиной  $(10-15) \times 10^{-3}$  м и шириной  $(2-4) \times 10^{-6}$  м. Вид треков был разный – наблюдались как непрерывные, так и треки сложной формы, похожие на спирали или меандр. На рис. 4 показан вид треков при большом увеличении [3]. Частицы, оставившие треки, двигались параллельно плоскости фотопленки. Энергия частиц, оцененная по длине пробега, была не меньше 80–100 МэВ. Такие же треки обнаружены на поверхности пластины кремния, расположенной рядом с цилиндрической мишенью [3].

За годы, прошедшие после обнаружения эффекта сверхглубокого проникания частиц, эти опыты повторяли многие исследователи. Помимо подтверждения факта проникания частиц на большую глубину появились сведения об обнаружении изменения концентраций элементов в канале, оставленном частицей. Так, при исходном содержании марганца в материале мишени 0.2% его содержание в канале увеличилось до 40%, алюминия – до 14%, свинца – до 18%. Более того, в волокне, образовавшемся в канале, был обнаружен изотоп железа  $Fe^{55}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = 2.7$  г. (Изотоп  $Fe^{55}$  путем захвата орбитального электрона превращается в стабильный изотоп  $Mn^{55}$ ) [5, 6].

Главной проблемой создания теории сверхглубокого проникания частиц является поиск источника энергии, необходимой для осуществления данного процесса. Кинетическая энергия облака микрочастиц не превышает  $5 \times 10^4$  Дж, тогда как на образование кратеров, каналов (разрушение химических связей в материале мишени), закрытие каналов (образование новых химических связей), изменение размера зерен металла и двойникование

(а)

(б)



Рис. 4. Треки, образовавшиеся на фотопленке, обернутой вокруг цилиндрического образца: а – образец из алюминия ( $\times 500$ ), б – образец из стали ( $\times 600$ ).

требуется энергия как минимум в 10 раз больше. В связи с этим предполагается [5, 6] существование неучтенного источника энергии, возникающего только в режиме сверхглубокого проникания и независимого от внешнего воздействия. По мнению исследователей, возможным источником дополнительной энергии служит плотная плазма, которая образуется на границах раздела частица–мишень. На поверхности трущихся частиц возникают электрические заряды. Заряженные бомбардирующие частицы сближаются с химическими связями вещества мишени на расстояния порядка межатомных. Чем больше заряд на поверхности частицы-ударника, тем выше вероятность того, что энергия будет передана химической связи – электронам. Благодаря этому в пределах границы раздела частица–мишень в качестве первичных продуктов образуются ионы и электроны. Смещение атомов при соударении возбуждает связи, а кулоновское влияние поверхностных зарядов частицы вызывает разрушение этих связей. Ударно-волновые процессы в мишени увеличивают амплитуду колебаний атомов в узлах решетки. Происходит разрыв связей в материале решетки. Поскольку расстояние, проходимое частицей, превышает ее размер, предполагается, что потери энергии компенсируются непрерывным поступлением плазмы в зону, образованную поверхностями частицы и мишени. Обновление плазмы осуществляется за счет диссоциации связей каждого последующего атомного слоя мишени и частично – связей материала ударника. Появление электромагнитного излучения и следов на фотопленках, оставленных частицами с энергией 10–100 МэВ, объясняется гипотезой о протекании в каналах реакций термоядерного синтеза. По-видимому, источником дополнительной энергии могут быть многочисленные микровзрывы (термоядерные микровзрывы по объему металлической преграды) вдоль треков порошковых частиц [5, 6].

Другим направлением развития теории сверхглубокого проникания частиц является поиск природы сил, действующих на частицы, и причин уменьшения силы трения частиц. Предложено много гипотез. Согласно одной из них считается, что при движении частицы внутри твердого тела перед ней выделяется энергия. Это модифицирует материал мишени, делая его пластичным. Источником движущей силы является процесс “схлопывания” канала за частицей. Из-за отвода тепла от канала в зоне схлопывания возникает напряжение металла при его отвердевании, создающее силу типа клина, давящего на частицу [7]. В [8] предложена гипотеза захвата микрочастиц фронтом ударной волны, имеющей конечную ширину. В [9] предполагалось, что у мелких частиц предел текучести много выше, чем у сплошной среды. Каждая частица пробивает себе дорогу за счет кинетической энергии, и позади нее возникает канал. При

его схлопывании образуется кумулятивная струя. Она догоняет частицу, подталкивает ее и возвращает затраченную энергию.

Согласно [10] проникание частиц на глубину 0.2 м может происходить из-за аномально низких значений вязкости металла. При этом вязкость изменяется только в пределах зоны, ограниченной поверхностью контакта преграды и микрочастиц. Температура микрочастиц в облаке кумулятивного выстрела не превышает 1200 К, т.е. в момент удара она намного меньше температуры плавления металла. Предполагается, что частица может захватить  $10^2$ – $10^5$  электронов или ионов. При этом кулоновская энергия взаимодействия частиц будет намного превышать тепловую энергию. В результате удара возникает ударная волна со скоростью 5100 м/с (для стали). Фононы взаимодействуют со свободными электронами металла и электронами, образующими химические связи, а также с зарядами на поверхности микрочастиц. Время действия звуковой волны для частиц диаметром 20–120 мкм составляет  $(2-12) \times 10^{-8}$  с. Звуковые волны опережают микрочастицы и взаимодействуют с химически связанными и свободными электронами. Электроны переходят на более высокий энергетический уровень. Переход электрона с уровня на уровень длится  $10^{-13}$ – $10^{-12}$  с, а релаксация валентных электронов при переходе на более низкие уровни происходит за время  $t_{rel} = 10^{-5}$ – $10^{-4}$  с. То есть свободные электроны играют роль доноров энергии, разрыхляющей химические связи. Связи дополнительно возбуждаются и рвутся, частицы начинают движение в “плазме твердого тела”. Разность времен возбуждения и релаксации дает промежуток времени, в течение которого снижается вязкость в канале, ограниченном поверхностью контакта микрочастицы и преграды. Расчет показывает, что величина вязкости уменьшается до  $\eta = 0.005$ – $0.08$  Н/м.

В [11] предполагалось, что инородное вещество движется в преграде не в виде макроскопических частичек, а в виде групп разрозненных молекул, перемещающихся внутри ударных фронтов под действием градиентов давления, т.е. посредством бародиффузии. Согласно [12] при движении частицы в вязкой несжимаемой среде из-за локального нагрева слоев, примыкающих к плоскости скольжения, возникает разупорядочение среды и происходит ее нагрев до температуры плавления. При  $2P/\rho v^2 > 1$  ( $P$  – давление,  $\rho$  – плотность преграды,  $v$  – скорость частицы) реализуется условие “парадокса Даламбера” – возникает фаза ламинарного обтекания частицы без сопротивления. Для стальных мишеней при давлениях 1–4 ГПа скорость стационарного движения частицы составляет 0.5 км/с. При условии, что время существования полей давления равно  $2 \times 10^{-5}$  с, частица проникает на глубину  $10^{-2}$  м.

Попытки объяснить причины появления магнитного поля и треков на фотопленках встречаются лишь в нескольких работах. В [3] возникновение магнитного поля объясняется движением магнитных диполей в электрическом поле, которое появляется из-за перераспределения электрических зарядов в потоке частиц, перемешанных с продуктами взрывчатого вещества. Никаких оценок и описания деталей происходящих процессов не приводится. Еще более сомнительно объяснение причины появления треков на фотопленках. Предполагается, что в неких “горячих точках” внутри мишени генерируются высокоэнергетические “галактические” ионы, которые, выйдя наружу, движутся с большой скоростью вдоль поверхности пленки. Никаких количественных оценок этого процесса не приводится.

К сожалению, почти полувековая работа по созданию теории сверхглубокого проникания частиц в твердую среду так и не принесла результата. Многие модели не согласуются и, более того, противоречат друг другу. Например, утверждается, что твердая частица движется в твердой фазе без трения, но может прочертить в ней след своим веществом, т.е. она движется с трением [9]. Все объяснения опираются на предположение, что у мелких частиц предел текучести много выше, чем у сплошной среды. Известно, что при движении в сплошной среде диссипация механической энергии у крупных тел относительно меньше, чем у мелких частиц, поэтому они должны проникать на большую глубину. Однако этот вывод противоречит экспериментам. Есть критический размер  $d_c \sim 10^{-4}$  м, и для  $d > d_c$  проникания не наблюдается. В большинстве моделей проникания предполагается, что каждая частица пробивает себе дорогу за счет кинетической энергии. Позади нее появляется канал. При его схлопывании возникает кумулятивная струя. Она догоняет частицу, подталкивает ее и возвращает затраченную энергию. При этом не учитывается, что любое распределение давления, порождаемое в преграде потоком частиц, не является стационарным. Зона, в которой существует нужное распределение давления, должна двигаться со скоростью звука (4 км/с). С такой же скоростью, чтобы не выйти из этой зоны, должна двигаться и частица. При этой скорости в преграде возникает ударная волна с амплитудой 200 ГПа, что в несколько раз превосходит теоретическую прочность  $\sigma_t$  любого твердого тела. Например, для частиц вольфрама  $\sigma_t \sim E/(2\pi) = 60$  ГПа ( $E$  – модуль Юнга). В частицах размером  $10^{-5}$ – $10^{-4}$  м есть дислокации. Предел прочности таких частиц на порядок меньше, поэтому при движении они разрушатся. Обнаружено, что при движении микрочастиц каналы схлопываются. Вблизи каналов образуются области интенсивного пластического течения с высокодефектной, частично аморфизированной структурой

[12, 13], что противоречит концепции упругой деформации и хрупкого разрушения среды опережающей трещиной [14, 15].

В настоящей работе предлагается новая гипотеза объяснения причин проникания частиц на большие глубины.

### ГИПОТЕЗА ЭФФЕКТА СВЕРХГЛУБОКОГО ПРОНИКАНИЯ ЧАСТИЦ В ТВЕРДОЕ ТЕЛО

Начнем с объяснения природы странных прерывистых следов, появившихся на фотопленках и кремниевых пластинках в опытах по исследованию эффекта сверхглубокого проникания частиц. Такие же необычные следы неоднократно обнаруживались при электрических разрядах в воде [16–25] (рис. 5). Самыми интересными из них были симметричные следы (“следы-близнецы”) [19, 24]. В [23–25] показано, что наиболее подходящим объектом, способным оставить такие следы, являются многозарядные кластеры из молекул воды. В этих кластерах некий ансамбль ионов с суммарным зарядом  $Q$  удерживается внутри сферической оболочки из поляризованных молекул воды. Кулоновская сила расталкивания ионов, находящихся на поверхности сферы радиусом  $r$ , равна

$$F_Q = Q^2/(8\pi\epsilon_0 r^2). \quad (1)$$

Эта сила компенсируется давлением на поверхность сферы слоя поляризованных молекул воды толщиной  $a$ :

$$F_{at} = (\sigma a 4\pi R^2) \text{grad}(Q/4\pi\epsilon_0 R^2) = (2\sigma a Q)/(\epsilon_0 R), \quad (2)$$

где  $\sigma = 1$  Кл/м<sup>2</sup> – плотность зарядов концов диполей воды на поверхности сферы. Радиус такого кластера  $R = r + a$ .

Заряженный кластер, приближающийся к поверхности твердого тела, поляризует его вещество и притягивается к ней. Оказавшись вблизи поверхности, он отделяет от себя часть заряда, который, ударившись о поверхность (фотопленки или кремниевой пластины), оставляет на ней след. Кластер, получив импульс отдачи, взлетает над пленкой. Затормаживаясь из-за действия силы притяжения к поверхности, кластер останавливается и начинает снова “падать” на пленку [23, 24]. В результате на пленке образуется цепь следов, похожих на следы, показанные на рис. 4, 5. Самое непонятное свойство таких кластеров – способность внедряться в твердые тела и оставлять в них следы в виде каналов [22]. Мигрируя внутри твердого тела, эти кластеры иногда выходят на его поверхность.

Предположим, что частицы, оставившие следы на пленках и зарегистрированные в опытах по исследованию эффекта сверхглубокого проникания, идентичны описанному многозарядным кластерам. Сначала рассмотрим: как могли образоваться такие

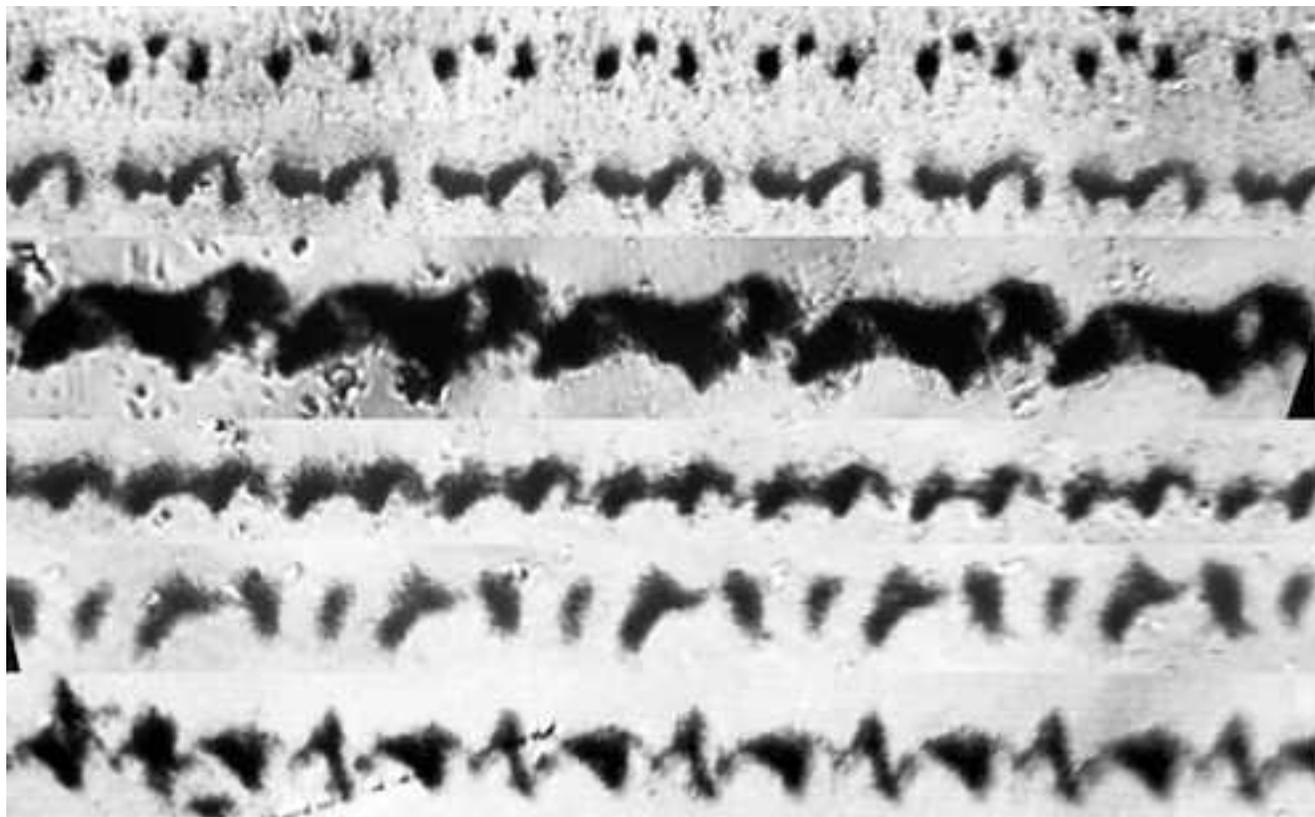


Рис. 5. Треки, образовавшиеся на фотопленке, расположенной вблизи зоны электрического разряда в воде.

частицы? В [26] обсуждались эффекты, возникающие при ударе снаряда в броню, и было высказано предположение, что при торможении снаряда часть электронов, двигаясь по инерции, покидает снаряд. В результате снаряд становится положительно заряженным.

Воспользуемся идеей, приведенной в [26], и предположим, что частицы металлического порошка, летящие со скоростью 1–3 км/с, при столкновении с преградой теряют часть электронов и приобретают положительный заряд. Пусть с мишенью соударяется сферический шарик из титана. Оценим, какой заряд может приобрести титановый шарик радиусом  $R = 30$  мкм, столкнувшийся со стальной мишенью. Плотность титана  $4.5 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. При  $R = 3 \times 10^{-5}$  м объем  $V = 1.13 \times 10^{-13}$  м<sup>3</sup>, масса  $M = 5 \times 10^{-10}$  кг. Кинетическая энергия шарика, летящего со скоростью 3000 м/с, равна  $E_c = 2.25 \times 10^{-3}$  Дж. Рассмотрим процесс перехода электронов с частицы на мишень. При этом будем учитывать, что по мере изъятия части отрицательного заряда шарика величина оставшегося у него положительного заряда растет, следовательно, работа по отъему следующей порции отрицательного заряда постоянно увеличивается. Пусть сначала в мишень перешла порция отрицательного заряда  $\Delta q$ . Частица приобрела положительный заряд  $\Delta q$ . Работа по разведению зарядов от расстояния  $R$  до  $\infty$  равна

$\Delta A_1 = (\Delta q)^2 / (4\pi\epsilon_0 R)$ . После этого положительный заряд частицы стал  $2\Delta q$ . При отделении от этой частицы отрицательного заряда величиной  $\Delta q$  будет сделана работа  $\Delta A_2 = (2\Delta q)(\Delta q) / (4\pi\epsilon_0 R)$ . При отделении  $n$ -го заряда  $\Delta q$  будет затрачена работа  $\Delta A_n = (n\Delta q)(\Delta q) / (4\pi\epsilon_0 R)$ . Полная работа при совершении  $n$  шагов  $A = \sum(\Delta A_n) \approx (n^2/2)(\Delta q)^2 / (4\pi\epsilon_0 R)$ . Приравняем ее к кинетической энергии частицы  $E_c$ :

$$(n^2)(\Delta q)^2 = E_c \cdot 8\pi\epsilon_0 R. \quad (3)$$

Положительный заряд  $Q$ , оставшийся на частице, равен  $n\Delta q$ , поэтому

$$Q = (E_c \cdot 8\pi\epsilon_0 R)^{1/2}. \quad (4)$$

Подставив в эту формулу  $R = 3 \times 10^{-5}$  м и  $E_c = 2.25 \times 10^{-3}$  Дж, находим заряд  $Q$ , приобретенный шариком:  $Q = 1.145 \times 10^{-9}$  Кл ( $7.16 \times 10^9$  элементарных зарядов).

Электроны, перешедшие от шарика к цилиндрическому стержню, двигаясь вдоль его оси, уйдут в землю (рис. 1). Пусть заряд, доставленный одним шариком, равен  $Q = 10^{-9}$  Кл. Масса шарика равна  $M = 5 \times 10^{-10}$  кг. Пусть полная масса облака частиц равна  $M_c = 10$  г. Отсюда находим количество шариков  $N_b = M_c/M = 2 \times 10^7$  и их суммарный заряд  $Q_c = N_b Q = 2 \times 10^{-2}$  Кл. Приняв линейный размер облака частиц равным  $L = 0.1$  м и считая, что скорость

частиц равна  $v = 3 \times 10^3$  м/с, находим время действия облака на мишень:  $\tau = L/v = 0.33 \times 10^{-4}$  с. Таким образом, ток, прошедший по стержню, равен  $I = Q/\tau = 6 \times 10^2$  А. В [3] измерялась магнитная индукция вблизи стального цилиндра, в торец которого ударяется поток частиц. На расстоянии  $R_{ex} = 0.15$  м от оси цилиндра ее величина оказалась равной  $B = 10^{-3} - 10^{-2}$  Тл. Напряженность магнитного поля на расстоянии  $R$  от прямого провода, по которому течет ток  $I$ , равна  $H = I/2\pi R$  (А/м) [27]. Магнитное поле связано с индукцией соотношением  $H = B/\mu_0 = B/4\pi \times 10^{-7}$ . Отсюда находим ток  $I = H \times 2\pi R = B \times 2\pi R/4\pi \times 10^{-7}$  А. Приняв  $B = 10^{-3}$  Тл и  $R_{ex} = 0.15$  м, получаем  $I = 7.5 \times 10^2$  А. Это близко к полученной в настоящей работе оценке. Определим величину давления на поверхность стальной мишени титанового шарика радиусом  $R = 3 \times 10^{-5}$  м, обладающего зарядом  $Q = 10^{-9}$  Кл. Рассмотрим момент, когда шарик только что коснулся поверхности. Сила его притяжения к проводящей плоскости равна

$$F_{at} = Q^2/[4\pi\epsilon_0(2R)^2] = 2.498 \text{ Н.} \quad (5)$$

Площадь сечения шарика  $s = \pi R^2 = 2.826 \times 10^{-9}$  м<sup>2</sup>. Давление шарика на поверхность равно  $P = F_{at}/s = 8.84 \times 10^8$  Па = 884 МПа. Предел прочности стали-10 равен  $P_t = 330$  МПа. Следовательно, шарик должен внедриться внутрь материала мишени.

Оказавшись внутри мишени, заряженный шарик давит на стенки образовавшегося канала. Оценим величину этого давления. Окружим заряд  $Q = 10^{-9}$  Кл сферой радиусом  $R = 3 \times 10^{-5}$  м. Заряд будет оказывать на эту сферу давление

$$P_Q = [Q^2/(8\pi\epsilon_0 R^2)]/(4\pi R^2) = 442 \text{ МПа.} \quad (6)$$

В многозарядных кластерах, состоящих из поляризованных молекул воды, кулоновское давление ионов компенсируется противоположно направленным давлением водной оболочки [23–25]. Пусть ионы с суммарным зарядом  $Q = 10^{-9}$  Кл находятся внутри сферы радиусом  $r$  и растягивают ее с силой  $F_Q = Q^2/(8\pi\epsilon_0 r^2)$ . Сфера окружена оболочкой из поляризованных молекул воды толщиной  $a$ , которая сжимает полость с ионами с силой

$$F_a = (\sigma a \cdot 4\pi r^2 \cdot 2Q)/(4\pi\epsilon_0 r^3) = (2\sigma Qa)/(\epsilon_0 r). \quad (7)$$

Здесь  $\sigma = 1$  Кл/м<sup>2</sup> – плотность зарядов концов диполей воды на поверхности сферы с ионами. Приравняв  $F_a$  к  $F_Q$ , находим  $a = Q/16\pi\sigma$ . Подставив в это выражение  $r = R - a$ , получаем уравнение  $a^2 - aR + Q/4\pi\sigma = 0$ . Подставив в уравнение  $R = 3 \times 10^{-5}$  м, находим  $a = 2.964 \times 10^{-5}$  м, что чуть меньше радиуса  $R$ . Таким образом, если бы вокруг заряда титанового шарика появилась оболочка из поляризованных диполей (например, из оксида металла) со способностью поляризоваться, как молекулы воды, то он мог бы существовать без внешнего давления. Однако толщина пленки

из оксида, адсорбированных молекул воды и продуктов взрывчатого вещества вряд ли может быть больше  $a_1 = 10^{-7}$  м. Она будет оказывать давление на шарик

$$P_{sh} = (\sigma Q a_1)/(2\pi\epsilon_0 R^3) = 66.6 \text{ МПа.} \quad (8)$$

При этом давление шарика на материал мишени снизится до 375 МПа (формула (6)), но все равно оно останется большим.

Рассмотрим, как будет двигаться внутри материала мишени шарик, обладающий положительным электрическим зарядом  $Q_b$ . Пусть центр шарика углубился внутрь мишени на расстояние чуть больше, чем радиус шарика  $l = 4 \times 10^{-5}$  м. При внедрении шарика внутрь материала стальной мишени на ее стенках появятся положительные заряды и возникнет сила, отталкивающая шарик от этих зарядов. Сила эта принимает максимальное значение при отталкивании шарика от ближайшей поверхности мишени. При нахождении центра шарика на расстоянии  $r_{in} = 4 \times 10^{-5}$  м от поверхности мишени на него будет действовать сила  $F_{rp}$ , направленная вглубь мишени:

$$F_{rp} = Q_b^2/[4\pi\epsilon_0(2r_{in})^2]. \quad (9)$$

Если заряд шарика  $Q_b$  останется равным  $10^{-9}$  Кл,  $F_{rp} = 1.4$  Н. По мере перемещения шарика вглубь мишени величина  $F_{rp}$  будет уменьшаться. При  $r_{in} = 5 \times 10^{-2}$  м получим  $F_{rp} = 8.99 \times 10^{-7}$  Н, а при нахождении шарика в точке на половине длины мишени  $F_{rp} = 0$ .

Однако нет оснований считать, что эффективное значение величины заряда тела, погруженного в проводящую среду, будет равно его истинной величине. Когда заряженный шарик окажется внутри проводящей среды, вокруг него соберутся электроны, ослабляющие действие электрического поля шарика (образуется сферический конденсатор). Фактически произойдет как бы уменьшение заряда шарика. Однако уменьшение напряженности внешнего электрического поля будет неполным. Благодаря тепловому движению электроны обладают кинетической энергией, и на некотором расстоянии от центра заряда напряженность поля станет недостаточной для удержания электрона. Определим, при какой величине заряда  $Q_b$  сферической частицы радиусом  $R = 3 \times 10^{-5}$  м работа отрыва электрона от ее поверхности станет равной  $W_c = k_B T$  ( $k_B$  – постоянная Больцмана). При  $T = 300$  К получим  $W_c = 4.14 \times 10^{-21}$  Дж. Сила притяжения электрона к сфере радиусом  $R_b$  равна  $F_q = (Q_b q)/(4\pi\epsilon_0 R_b^2)$ . Работа по удалению электрона с расстояния  $R_b$  на  $\infty$ :  $A = \int F_q dR_b = (Q_b q)/(4\pi\epsilon_0 R_b)$ . Приравнявая  $A$  к  $W_c$ , получаем

$$Q_b = (k_B T \cdot 4\pi\epsilon_0 R_b)/q, \quad (10)$$

где  $q = 1.6 \times 10^{-19}$  Кл – заряд электрона. Подставляя в (10) численные значения, находим  $Q = 8.63 \times 10^{-17}$  Кл (540 элементарных зарядов).

При такой величине заряда напряженность поля на поверхности частицы равна всего  $8.6 \times 10^2$  В/м.

Возможно, предположение, что  $T = 300$  К, неправильно. В кластере с оболочкой из молекул воды, согласно критерию Ланжевена, критическая напряженность поля равна  $2 \times 10^9$  В/м (в  $10^6$  раз больше) [24, 25]. Таким образом получается, что сила, требуемая для поворота диполя, почему-то должна быть в миллион раз больше, чем для удержания электрона. Похоже на то, что электрон не свободен, а довольно сильно связан с кристаллической решеткой. Кроме этого, во-первых, электронная температура (а именно она важна в рассматриваемом случае) может быть гораздо больше ионной. Во-вторых, в образце присутствуют ударные волны, трясущие решетку. Это эквивалентно некоторой температуре, которая выше 300 К на 2–3 порядка. Поэтому заряд  $Q_b$  в течение времени сотрясения решетки может быть не меньше  $10^5$ – $10^6$  элементарных зарядов. Можно предположить, что заряженный шарик будет перемещаться внутри мишени скачками: замирать, когда она не колеблется, и двигаться, когда она сильно трясется. Вероятно, это объясняет тот факт, что сверхглубокое проникание происходит при ударах не одиночных частиц, а является эффектом коллективного действия многих частиц. В предлагаемой модели время, в течение которого происходит проникание частиц, может быть намного больше, чем длительность удара сгустка частиц или воздействие звуковой либо ударной волны. Согласно [22] частицы, появляющиеся при электрических разрядах в воде (свойства которых можно считать близкими к свойствам обсуждаемых частиц), могут находиться внутри твердого тела в течение времени, измеряемого сутками.

Обсудим, как сильно сдавленный металлический шарик под действием довольно слабой электрической силы может переместиться в твердом теле на большое расстояние. Единственный шанс сделать это – как можно больше уменьшить силу трения среды в зоне контакта. Внедрившаяся частица при этом должна обладать способностью длительное время удерживать приобретенный электрический заряд. Для этого ее оболочка (состоящая из диэлектрика, например оксидов и воды) должна быть хорошим изолятором.

В течение всей истории развития химии считалось, что в твердом теле химические реакции не идут из-за пренебрежимо низкой скорости диффузии реагентов. Однако в конце XX века ученым из Института химической физики АН СССР удалось показать: если в твердом теле, подвергнутом высокому давлению, осуществить деформацию сдвига, в нем начинают интенсивно идти химические реакции [28, 29]. Они обнаружили, что химическая реакция протекает именно в момент деформации твердого тела. В опытах по демонстрации этого эффекта испытываемое вещество (например, металл) помещали между двумя дисками (“наковальнями Бриджмена” [30]) и подвергали сильному сжатию. В момент приложения силы одна из “наковален” поворачивалась на некоторый угол вокруг своей оси. При этом связи между атомами в

кристаллической решетке рвались, и металл приобретал большую пластичность. Эффективная константа диффузии в металле увеличивалась на 10 порядков и была на 3–4 порядка больше, чем в жидком металле [31].

Это явление интересно тем, что в момент деформации сильно уменьшается вязкость металла. Поверхность металлического шарика, вклинившегося в металл, сдавливается деформированной кристаллической решеткой. В момент действия на шарик силы, вызывающей его смещение, межатомные связи между поверхностью шарика и поверхностью металла мишени рвутся. При этом сила трения падает практически до нуля. После смещения шарика на некоторое расстояние канал, созданный им, закрывается силой давления кристаллической решетки металла мишени. Движение заряженного шарика внутри металла определяется действием сил, возникающих из-за поляризации близлежащих кристаллических зерен. Некоторые заряженные шарики могут выйти наружу и оставить следы на фотографических пленках.

Обогащение зоны контакта марганцем, алюминием и свинцом, по-видимому, могло произойти из-за разной скорости диффузии различных веществ в зоне сверхнизкой вязкости материала. Факт изменения изотопного состава элементов (например, появление изотопа железа  $Fe^{55}$ ) коррелирует с результатами опытов [17]. В этих опытах было обнаружено, что при взрывах пластинок титановой фольги в воде содержание изотопа  $Ti^{48}$  уменьшилось на 4%. Не исключено, что указанные превращения могли быть каким-то образом связаны с фактом долгого пребывания частиц, обладающих большим электрическим зарядом, внутри твердого тела [25].

Попробуем найти объяснение тому, что частицы радиусом  $R = 30$  мкм способны проникать на большую глубину, а частицы радиусом меньше 3 мкм и больше 120 мкм такой способностью не обладают (рис. 3). Выше установлено (формула (2)), что частица радиусом  $R$  при ударе в мишень приобретает заряд  $Q = (E_c \cdot 8\pi\epsilon_0 R)^{1/2}$  Кл. Кинетическая энергия  $E_c = Mv^2/2 = (\rho \cdot 4\pi R^3/3)(v^2/2)$ , где  $M$  – масса частицы,  $v$  – ее скорость, а  $\rho$  – плотность материала частицы. Тогда заряд частицы

$$Q = [(\rho \cdot 2\pi R^3 v^2 \cdot 8\pi\epsilon_0 R)/3]^{1/2} = K(R^4)^{1/2} = KR^2, \quad (11)$$

где

$$K = [(16\pi^2\epsilon_0\rho v^2)/3]^{1/2}. \quad (12)$$

Подставив в (12)  $\rho = 4.5 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и  $v = 3 \times 10^3$  м/с, находим  $K = 4.34$  Кл/м<sup>2</sup>. Согласно (9) сила  $F_{rp}$ , действующая на заряженную частицу, находящуюся внутри проводящего тела, пропорциональна величине квадрата ее заряда:

$$F_{rp} \sim Q^2 = K^2 R^4. \quad (13)$$

Для удобства анализа отложим по горизонтальной оси значения  $R^2$ . В этом случае зависимость

$F_{rp} = f(R^2)$  на рис. 6 имеет вид параболы. Противоположно силе  $F_{rp}$  действует сила  $F_{fr}$  трения частицы о стенку канала в мишени. Эта сила появляется из-за роста числа дислокаций в материале мишени [32]. При небольшой скорости образования дислокаций (и, соответственно, при малых значениях радиуса частицы) величину силы торможения можно считать пропорциональной площади поверхности трущейся частицы:  $F_{fr} \sim R^2$ . Однако при некотором значении радиуса  $R_{cr}$  плотность образующихся дислокаций достигает максимального значения и в результате резко увеличивается твердость металла. Поэтому можно считать, что при  $R > R_{cr}$  закон торможения частицы меняется на  $F_{fr} \sim nR^2$ , где  $n > 1$ . На рис. 6 показана эта зависимость при  $n = 2$ . Можно видеть, что в областях  $0 < R^2 < R_0^2$  и  $R^2 > R_{max}^2$  сила трения больше электрической силы  $F_{rp}$ , следовательно, движение частицы невозможно. При  $R^2 = R_{cr}^2$  степень превышения силой  $F_{rp}$  величины силы  $F_{fr}$  максимальна, что способствует прониканию частиц с  $R = R_{cr}$  на большие расстояния.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена новая гипотеза объяснения комплекса явлений, сопровождающих процесс сверхглубокого проникания в мишень быстрых металлических частиц: появление прерывистых следов на фотопленках и генерирование импульса магнитного поля. По-видимому, магнитное поле создается потоком электронов, срывающихся с частицы при торможении, в результате чего она приобретает положительный заряд. Этот заряд заставляет частицу внедриться внутрь мишени. Оказавшись внутри твердого тела, заряженная частица в течение некоторого времени, пока длится колебания кристаллической решетки, движется в нем под действием электрических полей. Благодаря комбинации эффектов сверхвысокого давления и сдвига сжатой частицы существенно уменьшается вязкость металла. Часть заряженных частиц выходит наружу из материала мишени и, взаимодействуя с поверхностью фотопленки или твердой пластины, оставляет на ней цепь следов. Данная гипотеза требует более полной проработки. В частности, предстоит найти количественное объяснение поведения заряженных кластеров внутри проводника, причин преимущественного проникания частиц среднего размера и других тонких деталей [33]. Не предлагаем здесь идеи объяснения механизмов изменения изотопного состава элементов, но надеемся, что эти процессы будут изучены в будущем [34].

Отметим, что создание теории эффекта сверхглубокого проникания важно не только для совершенствования процесса легирования материалов, но и для поиска путей нейтрализации этого эффекта. Дело в том, что космические аппараты постоянно подвергаются действию ударов высокоскоростных микроразмерных частиц, которые, проникая сквозь металлическую оболочку аппаратов, выводят из строя электронные приборы [3, 35, 36]. Многослойные металлические экраны не могут защитить

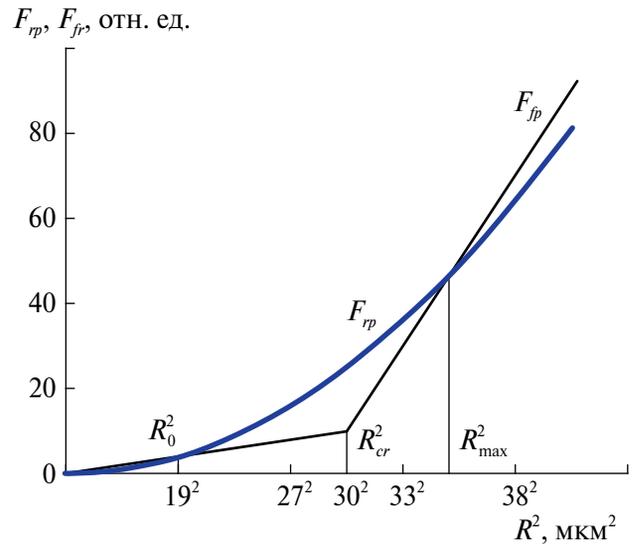


Рис. 6. Зависимость от квадрата радиуса частицы  $R^2$  силы действия на нее электрического поля  $F_{rp}$  и силы трения о стенку канала  $F_{fr}$ .

электронику. В [37] проводились исследования действия потоков высокоскоростных частиц на микросхемы, помещенные в герметичный алюминиевый контейнер с толщиной стенки 200 мкм. Контейнер подвергался действию ударов сгустков пылевых частиц, летящих со скоростью 300–3000 м/с. Было обнаружено, что при однократном действии потока частиц внутри контейнера повреждалось 10% микросхем, при трехкратном воздействии повреждались 33%, а при пятикратном – 85%. При этом герметичность контейнера не нарушалась. Если гипотеза, что внутрь космического аппарата проникают частицы с положительным зарядом, верна, можно попытаться затормозить их движение в оболочке, приложив к ней импульс электрического поля.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушеренко С.М. Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов. Минск: Изд-во НИИ импульсных процессов, 1998. 210 с.
2. Ушеренко С.М., Овчинников В.И., Коваль О.И., Зилкович С. // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. 2. Прикладные науки. Упрочнение деталей. 2003. Т. 2. № 4. С. 189.
3. Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника. В 2-х книгах. Книга 2. М.: Техносфера, 2015.
4. Ганигин С.Ю., Калашиников В.В., Журавлёв А.Н. и др. // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 1 (2). С. 537.
5. Соболев В.В., Ушеренко С.М. // Физика и техника высоких давлений. 2005. Т. 15. № 2. С. 86.
6. Sobolev V.V., Usherenko S.M. // J. Physique. 2006. V. IV. № 134. P. 977.

7. *Марукович Е.И., Ушеренко Ю.С.* // Литейное производство. Литье и металлургия. 2012. Т. 4. № 88. С. 120.
8. *Симоненко В.А., Скоркин Н.А., Башуров В.В.* // Физика горения и взрыва. 1991. № 4. С. 46.
9. *Роман О.В., Андилевко С.К., Карпенко С.С. и др.* // Инженерно-физический журнал. 2002. Т. 75. № 4. С. 187.
10. *Баскевич А.С.* // Вісті Донецького гірничого інституту. 2017. Т. 2. № 4. С. 182.
11. *Трофимов В.С., Петров Е.В., Алымов М.И.* // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. Физика. 2016. Т. 21. № 3. С. 1365.
12. *Альтшулер Л.В., Андилевко С.К., Романов Г.С. и др.* // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 5. С. 55.
13. *Андилевко С.К., Романов Г.С., Ушеренко С.М. и др.* // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. № 22. С. 42.
14. *Чёрный Г.Г.* // Докл. АН СССР. 1987. Т. 292. № 6. С. 1324.
15. *Григорян С.С.* // Докл. АН СССР. 1987. Т. 292. № 6. С. 1319.
16. *Matsumoto T.* // Proc. 5<sup>th</sup> International Symposium on Ball Lightning (ISBL97). Tsugawa-Town, Niigata, Japan, 1997. P. 193.
17. *Уруцкоев Л.И., Ликсонов В.И., Циноев В.Г.* // Прикладная физика. 2000. № 4. С. 83.
18. *Жигалов В.А.* // РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2021. Т. 13. № 3. С. 329. <https://doi.org/10.17725/rensit.2021.13.329>
19. *Fredericks K.A.* Possible detection of tachyon monopoles in photographic emulsions. June 7, 2013. <https://www.researchgate.net/publication/289165518>
20. *Ивойлов Н.Г.* // Георесурсы. 2005. Т. 2. № 17. С. 84.
21. *Богданович Б.Ю., Волков Н.В., Косточко Ю.П. и др.* // Инженерная физика. М.: МИФИ, 2000. № 1. С. 19.
22. *Нестерович А.В., Фетисов Г.П.* // Инженерная физика. М.: МИФИ, 2007. № 5. С. 7.
23. *Nikitin A.I., Nikitin V.A., Velichko A.M. et al.* // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2021. V. 218. P. 105525. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105525>
24. *Никитин А.И., Никитин В.А., Величко А.М. и др.* // РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2021. Т. 13. № 3. С. 355. <https://doi.org/10.17725/rensit.2021.13.355>.
25. *Никитин А.И., Никитин В.А., Величко А.М. и др.* // РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2022. Т. 14. № 3. С. 249. <https://doi.org/10.17725/rensit.2022.14.249>.
26. *Марахтанов М., Марахтанов А.* // Наука и жизнь. 2002. № 4. С. 16.
27. *Калашников С.Г.* Электричество. Учебное пособие. 5-е изд. М.: Наука, 1985. 576 с.
28. *Жорин В.А., Жаров А.А., Казакевич А.Г. и др.* // ФТТ. 1975. Т. 17. № 2. С. 393.
29. *Ениколопан Н.С., Жаров А.А., Жорин В.А. и др.* // Журнал прикладной механики и технической физики. 1974. № 1. С. 143.
30. *Бриджмен П.* Исследования больших пластических деформаций и разрыва. Влияние высокого гидростатического давления на механические свойства материалов. М.: ИИЛ, 1955.
31. *Ениколопов Н.С.* // Избранные труды. Воспоминания. Черноголовка: Изд-во ИСМАН, 1999. С. 102.
32. *Лактин Ю.М., Леонтьева В.П.* Материаловедение. Учебник для машиностроительных вузов. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1980. 493 с.
33. *Глезер А.М., Сундеев Р.В., Шалимова А.В. и др.* // Успехи физ. наук. 2023. Т. 193. № 1. С. 33. <https://doi.org/10.3367/UFNr:2021.07.039029>
34. *Mosier-Ross P.A., Forsley L.P., Miles M.H.* // J. Condens. Matter Nucl. Sci. 2021. V. 34. P. 1.
35. *Новиков Л.С.* Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты. МГУ НИИ ядерной физики. М.: Университетская книга, 2009. 104 с.
36. *Bernhard R.P., Christiansen E.L., Hude J.* // Int. J. Impact Engng. 1995. V. 17. P. 57.
37. *Ушеренко Ю.С., Ушеренко С.М., Шарифзянов В.Г.* // Труды Международной конференции XIX Харитоновские чтения. 17–21 апреля 2017. Саров, 2018. С. 10.

## THE PROCESS OF SUPERDEEP PENETRATION OF HIGH-SPEED METALLIC PARTICLES IN SOLID BODY

© 2024 A. I. Nikitin\*, V. A. Nikitin, A. M. Velichko, T. F. Nikitina

*V.L. Talrose Institute for Energy Problems of Chemical Physics at N.N. Semenov Federal Research Center  
for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

\*e-mail: [anikitin@chph.ras.ru](mailto:anikitin@chph.ras.ru)

**Abstract.** An explanation of the effects arising at the collision of a stream of metal particles with a size of 10–100 microns, moving at a speed of 1–3 km/s, with a solid target is proposed. It is assumed that at the moment of impact on the target, the particle loses some electrons and for some time, due to the presence of an oxide shell, retains a positive charge. The flow of electrons passing through the target at the moment of impact generates an electromagnetic field pulse. A particle with a charge of about  $10^{-9}$  C, having penetrated into a solid target, presses on the channel wall with a force of about 500 MPa and moves in it under the action of forces caused by the polarization of the target substance. The combination of high pressure and displacement leads to a significant reduction in the particle-wall friction force. The proposed hypothesis, if confirmed, can help find ways to protect electronic devices of spacecraft from impacts from streams of fast dust particles.