

УДК 537.634:621.762

О возможности получения нанопорошков при соударении металлических фольг, ускоренных давлением магнитного поля

В. П. Смирнов, Ю. А. Алексеев, М. Н. Казеев, В. С. Койдан,
С. П. Ананьев, В. Ф. Козлов, Ю. С. Толстов

Российский научный центр "Курчатовский институт", Институт ядерного синтеза,
Москва, Россия

Приведены описание устройства и результаты первых экспериментов по высокоскоростному соударению металлических фольг, разогнанных давлением магнитного поля, в целях изучения динамики их движения и разрушения, а также определения размеров продуктов "взрыва" фольг. Две металлические фольги ускорялись импульсным магнитным полем до относительной скорости $\sim 1\text{--}2$ км/с. При столкновении фольг приобретенная ими кинетическая энергия примерно за время распространения звука по фольге переходит в тепловую энергию. Показано, что при относительной скорости столкновения $\approx 1\text{--}1,5$ км/с фольги "взрываются". Размер частиц продуктов взрыва имеет диапазон $5\text{--}100$ нм.

Изучение поведения материалов в состояниях, когда импульсно вводимая плотность энергии в них близка или превышает энергию сублимации, — одна из важных научно-технических задач. В статических условиях получить такие состояния вещества трудно, однако проблема может быть решена при использовании электрофизических установок с большой импульсной мощностью. В этом случае важным являются процесс динамики разрушения проводников и исследование продуктов разрушения. В частности, возможно образование тонкодисперсных (вплоть до наноразмеров) порошков металлов, сплавов и их соединений, что представляет интерес для многих прикладных целей [1].

Существует ряд методов получения нанопорошков. Наряду с имеющимися методами получения нанопорошков, основанными на плазмохимических процессах с последующей конденсацией вещества, а также на механическом дроблении, интересно рассмотреть метод импульсного диспергирования вещества при взрывном разрушении проводников. Разрушению вещества с образованием наночастиц при электрическом взрыве проводников, нагретых импульсным током, посвящен ряд работ. Исследования по данному направлению привели к созданию установок практического назначения. Наиболее полно достигнутые результаты в этом направлении приведены в работе [2] и цитируемых в ней ссылках. Возможен также другой способ импульсного ввода энергии в вещество, ускоренное с помощью "взрыва", при котором приобретенная кинетическая энергия в конечном счете затрачивается на нагрев, деформацию, образование наночастиц и последующий разлет вещества [1]. Очевидно, что сообщить кинетическую

энергию веществу можно также давлением магнитного поля. Особенно просто это реализовать, ускоряя токонесущие проводники. Если ставить задачу получения порошков сложного химического состава с исходной примесью диэлектрических материалов, то и в этом случае электродинамический разгон возможен и для сложной слоистой структуры. Нет принципиальных трудностей на пути обеспечения гомогенизации вещества на конечной стадии. Особенность магнитного разгона вещества заключается также и в его Джоулевым нагреве под действием протекающего тока. Сообщенную тепловую энергию необходимо учитывать, подбирая скорость на конечной фазе разгона. При соударении одинаковых пластин отсутствуют примеси, которые могли бы поступать при столкновении с преградой.

В отличие от электрического взрыва проводников метод соударения потенциально обладает высокой производительностью. В работе [3] сообщается об экспериментах по ускорению алюминиевых фольг общей массой более 1 кг до требуемых скоростей. Как известно, при низкоиндуктивном источнике тока значительную часть запасенной энергии можно передать в кинетическую энергию разгоняемой пластины. Все сказанное выше является серьезным аргументом в пользу постановочных исследований генерации нанопорошков при соударении разогнанных магнитным полем веществ.

В данной статье впервые исследуется возможность получения нанопорошков методом высокоскоростного столкновения металлических фольг, а также изучается динамика их движения и разрушения.

Сущность данного метода состоит в том, что две металлические фольги ускоряются импульс-

ным магнитным полем до относительной скорости ~1—2 км/с. При столкновении фольг приобретенная ими кинетическая энергия примерно за время распространения звука по фольге переходит в тепловую энергию. Опираясь на результаты экспериментов по детонационному синтезу (получение нанокристаллических алмазных порошков с размерами частиц 4—10 нм), можно ожидать, что в рассматриваемом методе на стадии разрушения и разлета вещества будут получены наноструктуры.

В настоящее время в ИЯС РНЦ “Курчатовский институт” имеется оборудование, необходимое для проверки и использования предлагаемого метода. Это сильноточные генераторы, используемые в рамках программы исследований по импульсному управляемому термоядерному синтезу (УТС), генераторы сильных импульсных магнитных полей. На этом оборудовании ранее [4] были зарегистрированы скорости алюминиевых фольг более 1 км/с. Причем после взрыва фольг алюминий превращался в тонкодисперсную пыль. Аналогичные результаты получены при высокоскоростной кумуляции оболочек (скорости сжатия 1—2 км/с) из Al, Cu, Ta и других материалов [4]. Вопрос о размерах и эффективности образования частиц при разрушении таких материалов в данных экспериментах не исследовался и остается открытым.

Энергию образования наночастицы при столкновении фольг можно оценить, считая, что частица образуется при отрыве от макрочастицы

$$\varepsilon \approx \sigma a^3 \delta,$$

где σ — временное сопротивление разрыву материала фольги;

δ — относительное удлинение при разрыве;

a — размер частицы.

При больших скоростях деформаций σ может существенно превышать его значение, получаемое при статических испытаниях. Не рассматривая конкретных условий образования наночастиц, которые реализуются при столкновении фольг, оценим количество наночастиц вольфрама N_n , которые могут образоваться при столкновении. Рассмотрим образование частиц размерами 50 нм. Очевидно, можно записать

$$N_n = \eta Q / \varepsilon,$$

где η — эффективность образования наночастиц в этом диапазоне;

Q — кинетическая энергия столкновения фольг.

Значение η будет определяться конкуренцией генерации наночастиц с другими процессами, такими как нагрев, образование пластических течений, образование макрочастиц. Можно предположить, что величина η не может быть большой и скорее всего не превысит долей процента. Для типичной кинетической энергии разгона фольг

(вольфрам), которая может быть реализована при электродинамическом ускорении до скорости около 1 км/с и составляющей $Q \approx 10$ кДж/см³, и в предположении, что $\eta \sim 10^{-3}$ и $\delta = 10^{-2}$, можно ожидать образования числа наночастиц $N_n = 10^{14}$ см⁻³. При этом полная масса наночастиц может достигать заметной величины от массы материала фольги, участвующей в столкновении.

Таким образом, для экспериментальной проверки метода нужно разогнать фольги до скорости ~1 км/с.

Ниже изложены первые результаты исследования возможности получения нанопорошков при высокоскоростном столкновении металлических фольг.

Эксперимент

Схема эксперимента

На рис. 1 схематически показано устройство для ускорения фольг магнитным полем. Устройство монтируется на токоподводящем столе, который присоединяется к импульсному генератору тока — установке ТРОБ-100 [4]. Ток из источника питания протекает по двум фольгам и возвращается к источнику питания по обратному токопроводу. Для присоединения фольг использованы два контактных блока (нижний и верхний). Фольги протягиваются в пазы в контактных блоках и затем прижимаются пластинками и болтами. На рис. 2 приведен снимок устройства в сборе.

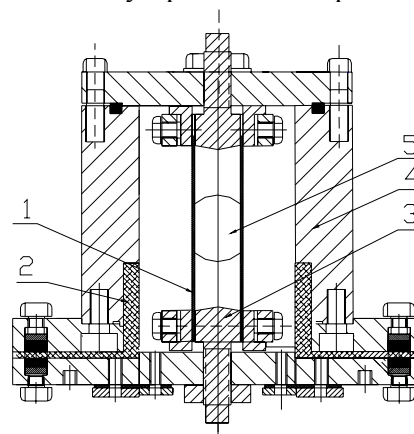


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — фольги; 2 — изолятор; 3 — контакты; 4 — обратный токопровод; 5 — диагностические окна

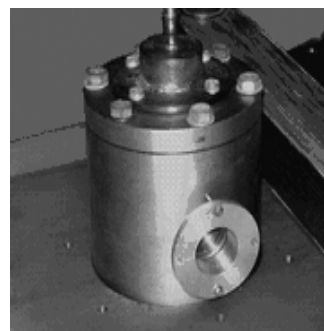


Рис. 2. Устройство для слопания фольг

Установка ТРОБ-100

Установка ТРОБ-100 — сильноточный генератор тока, выполненный на основе емкостного накопителя энергии. Коллектором тока установки являются две дюралевые пластины размером $\sim 1 \times 1$ м. Имеются две возможности подсоединения нагрузки. В первом случае нагрузка подсоединяется к одной из сторон коллектора, во втором — нагрузка может быть размещена в центре коллектора, где имеются отверстия диаметром ≈ 50 см. Основные технические характеристики установки ТРОБ-100 приведены ниже.

Максимальная запасаемая энергия, кДж.....	144
Максимальное напряжение, кВ.....	30
Полная емкость С, мкФ.....	320
Собственная индуктивность, нГн.....	5
Собственная частота, кГц.....	187
Диапазон рабочих напряжений, кВ.....	5—30
Ток короткого замыкания, МА (расчетный).....	≈ 5
Мощность, 10^{10} Вт.....	6
Число модулей.....	32
Тип разрядников.....	Вакуумные

Предварительные электротехнические измерения полного тока в цепи при неподвижной нагрузке позволили определить характеристики электротехнической цепи устройства (период колебаний тока, волновое сопротивление, затухание тока). Измерения проводились на медных пластинках длиной $L = 75$ мм, толщиной $d = 1$ мм и шириной $h = 10$ мм, ток измерялся поясом Роговского. Результаты измерений показали следующее: период колебаний тока $T = 24,4$ мкс; $\omega = 2,58 \cdot 10^5$ с $^{-1}$; затухание $\delta = 2 \cdot 10^4$ с $^{-1}$; суммарная индуктивность (с нагрузкой) $L_0 = 48$ нГн.

Таким образом, в рассматриваемом устройстве при напряжении зарядки генератора 20 кВ возможно получение токов до 1,5 МА.

Расчеты динамики ускорения фольг

Распределение магнитных полей в области расположения фольг является по крайней мере двухмерным. Магнитное поле на краях фольг превышает поле в их центре. С другой стороны, ширина фольги значительно превышает ее толщину ($d/h \ll 1$). Поэтому для оценки динамики ускорения фольг мы рассмотрели квазидвухмерную систему уравнений, включающую уравнения движения фольг, нелинейной диффузии магнитного поля в фольги, теплопроводности и электрической цепи генератора тока с учетом движения фольг [4].

Для определения величины магнитного поля на наружной и внутренней сторонах фольг в момент времени t решалось уравнение Лапласа $\Delta \vec{H} = 0$

при условии равенства нулю нормальной к поверхности фольги компоненты магнитного поля ($H_n = 0$) и фиксированном токе в фольгах. Магнитное поле на поверхности фольг в плоскости симметрии определялось из соотношения

$$H = \frac{0,4 \pi J}{h} \chi,$$

где коэффициент χ меняется со временем при движении фольги;
 J — ток, протекающий по фольге.

Измерения

В экспериментах измерялись полный ток с помощью пояса Роговского, магнитное поле вдоль внешней поверхности фольги с помощью магнитного зонда, зависимость от времени положения фольг. Для определения скорости движения фольг использовались щелевые развертки СФР-грамм. Щель СФР-грамма располагалась перпендикулярно плоскостям фольг в области симметрии. Скорость вращения зеркала составляла 45 тыс. об/мин ($\approx 4,5$ мкс/см на пленке). Для подсветки использовали лампу-вспышку. Для определения размеров частиц продуктов “взрыва” фольг применяли электронную микроскопию, а также сканирующий туннельный микроскоп.

Результаты экспериментов

На рис. 3 показана щелевая развертка СФР-граммы типичного эксперимента. В этом эксперименте ускорялись медные фольги толщиной 0,5 мм с наклеенными на них вольфрамовыми фольгами толщиной 0,1 мм. Ширина фольг — 10 мм, расстояние между ними — 2 см; напряжение зарядки генератора тока — 13,8 кВ. Максимальный ток в фольгах составлял ≈ 1 МА, период колебаний тока — 24,8 мкс.

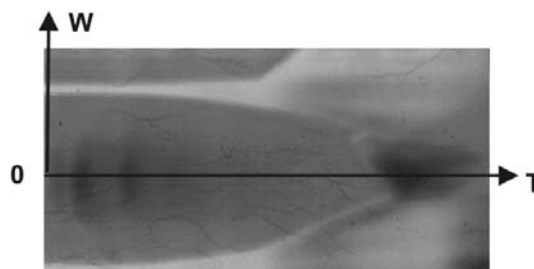


Рис. 3. Щелевая развертка СФР-граммы схлопывания фольг

На рис. 4 приведены экспериментальные временные зависимости суммарного тока и расстояния между фольгами, полученные из обработки СФР-грамм. На первом полупериоде максимальный ток, протекающий через одну фольгу, составляет $\approx 0,5$ МА; максимальное магнитное поле в

центре фольги при коэффициенте $\chi = 0,4$ — 250 кЭ. По оценкам, температура на поверхности меди ≈ 300 °С (за счет омического нагрева). Скорости схлопывания фольг, полученные из обработки СФР-грамм, составляют ≈ 800 — 900 м/с. Величина скорости столкновения фольг, полученная из расчетов, приблизительно равна 550 — 600 м/с. Отличие измеренных и расчетных скоростей столкновения фольг связано с тем, что края фольг движутся быстрее, чем их середина.

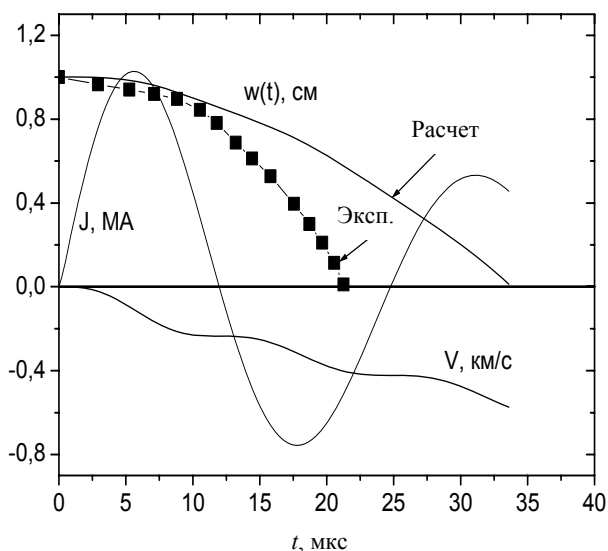


Рис. 4. Зависимости от времени суммарного тока в фольгах $J(t)$, измеренного и рассчитанного расстояния между фольгами $w(t)$ и расчетной скорости фольг $V(t)$

При столкновении фольги взрывались, а продукты взрыва оседали на стенках камеры (обратного токопровода).

Оценки плотности энергии (тепловой и кинетической) при взрыве фольг дают 2 — 3 кДж/см³ в меди и $4,5$ — 7 кДж/см³ в вольфраме. Эти величины существенно (приблизительно на порядок) ниже энергии сублимации рассматриваемых материалов. Оценки размеров частиц продуктов взрыва при коэффициенте $\alpha = 0,1$ дают величину $d \approx 30$ — 50 нм.

Для определения размеров частиц продуктов взрыва сметали мягкой кисточкой и растворяли в спирте. После этого из раствора были приготовлены образцы для исследования на электронном микроскопе. На рис. 5 и 6 показаны снимки, полученные с электронного микроскопа, из которых видно, что размер частиц продуктов взрыва лежит в диапазоне 5 — 100 нм. Форма частиц преимущественно сферическая.

Выводы

На основе численной модели ускорения металлических фольг при импульсном протекании тока с амплитудой $\sim 10^6$ А разработано устройство для

ускорения металлических фольг. В качестве источника питания использовался генератор импульсных токов ТРОБ-100. Получены скорости столкновения фольг величиной до $\approx 1,5$ км/с при суммарном токе в фольгах до 10^6 А.

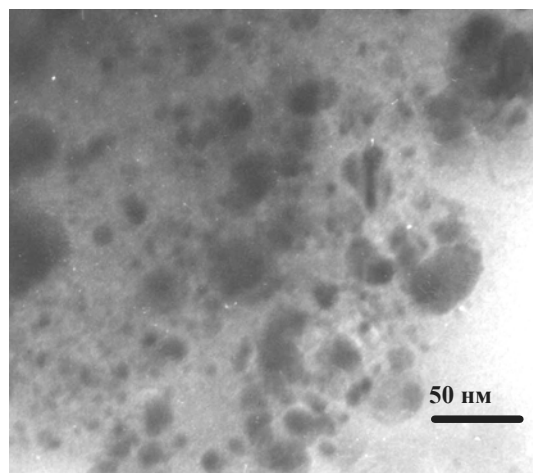


Рис. 5. Результаты электронной микроскопии

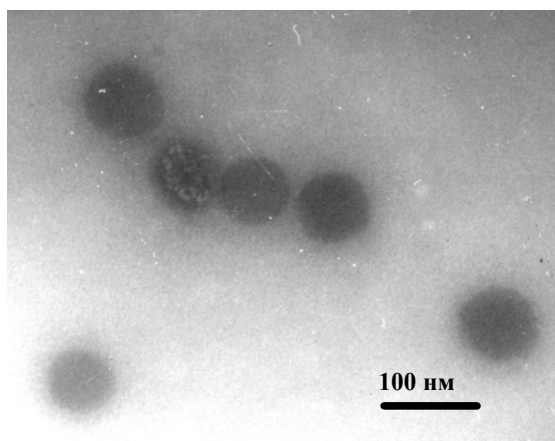


Рис. 6. Продукты сферической формы, обнаруженные с помощью электронного микроскопа

Результаты электронной микроскопии показали, что в продуктах разрушения при соударении фольг присутствуют частицы с характерными размерами 5 — 100 нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 05-08-50002).

Литература

1. Гусев А. И. Наноматериалы, структуры, технологии. — М.: Физматлит, 2005.
2. Kotov Yu. A. Electric Explosion of Wires as a Method for Preparation of Nanopowders//J. of Nanoparticale Research. 2003. № 5 (5—6). P. 539—550.
3. Azizov E. A., Bakhtin V. P., Grabovsky E. V. et al. The "Baikal" project-10 MJ generation of soft x-ray radiation for ICF/Proc. of 15th International Conference on High-power Particle Beams. — St.-Petersburg, July 18—23. 2004. P. 197—201.

4. Alexeev Y. A., Kazeev M. N., Petit J. Z and θ Current Geometry Features of Metallic Tubes Compression in Pulsed High Magnetic Fields to Study Constitutive Relations at High Strain

Rate/VIIIth International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Tallahassee, US. 18—23 October, 1998.

Статья поступила в редакцию 15 мая 2007 г.

The opportunity of nanopowders production due to impact of metal foils, accelerated by a magnetic field pressure

V. P. Smirnov, Y. A. Alexeev, M. N. Kazeev, V. S. Koidan, S. P. Anan'ev,
V. F. Kozlov, Y. S. Tolstov

Russian Research Centre Kurchatov Institute, Institute of Nuclear Fusion, Moscow, Russia

The tool description, results of first experiments on high velocity impact of metallic foils, accelerated by a magnetic field pressure are given in this paper. The purpose of the work is to study foils acceleration dynamics and decomposition and also to measure the dimension of products of explosion. Two metal foils were accelerated by a pulse magnetic field up to relative velocity ~ 1 — 2 km/s. At the impact of the foils, the directed energy, is transferred to thermal energy, during the time of order of sound propagation time in a metal foil. It is shown, that the foils are exploded at relative velocity of impact more than 1 — 1.5 km/s. The size of explosion products of fragments is in range of 5 — 100 nm.

УДК 537.533

Ионно-плазменные процессы в технологии изготовления матричных фоточувствительных элементов из КРТ

И. Д. Бурлаков, К. О. Болтарь, М. В. Седнев
ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Проведены исследования тепловых нагрузок, возникающих в процессах ионно-плазменных процессов напыления и травления. Разработаны и оптимизированы режимы ионно-плазменных процессов напыления, очистки от следов органических загрязнений и окислов для технологии матриц фотодиодов из структур кадмий—ртуть—теллур (КРТ), в которых температура пластин не превышает 70 °C. Представлены результаты формирования ионно-плазменным травлением матриц индиевых столбчатых микроконтактов.

Ионно-плазменные процессы широко применяются в современной технологии изготовления полупроводниковых приборов, в том числе изделий микрофотоэлектроники. В технологии изготовления матричных фоточувствительных элементов (МФЧЭ) на основе эпитаксиальных структур КРТ перспективно применение таких ионно-плазменных процессов как ВЧ-катодное и магнетронное распыление металлов и диэлектриков, плазмохимическая обработка для удаления загрязнений, адсорбированных молекул воды, остатков органики и фоторезиста, ионно-лучевое травление диэлектрических и металлических покрытий через фоторезистивную или другую маску, плазмохимическое травление слоев и другие процессы. Отказ от жидкостных травителей КРТ в пользу вакуум-

ных процессов с применением только инертных газов существенно повышает однородность характеристик матриц фотодиодов и их стабильность во времени при длительном хранении и использовании.

При применении ионно-плазменных процессов необходимо особое внимание уделять температурному режиму обработки, не допускать перегрева КРТ из-за возможной деградации его характеристик [1, 2]. Поверхность обрабатываемых пластин КРТ, закрепленных, как правило, на несущей подложке, в ионно-плазменных процессах подвергается воздействию ряда факторов: тепловому и ультрафиолетовому излучению, поглощению кинетической энергии падающих заряженных частиц (ионов и электронов), выделению тепла вследст