

Технологии разрушения и разделения материалов на основе электродинамических воздействий

© А.В. Бабкин, С.В. Ладов, С.В. Федоров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрена возможность использования в технологиях разрушения и разделения материалов электродинамических воздействий, связанных с электрическим взрывом в жидкой среде; созданием электродинамических сил между токопроводящими элементами путем пропускания по ним импульсного электрического тока; использованием методов магнитно-импульсной обработки материалов, в частности, метания металлической пластины, разогнанной импульсным магнитным полем. Предложенные технологии могут прийти на смену традиционным взрывным технологиям с использованием химических взрывчатых веществ, которые загрязняют окружающую среду и небезопасны при транспортировке и хранении.

Ключевые слова: технология, разрушение материалов, электрический взрыв, электродинамическое воздействие, электромагнитное метание.

Введение. В настоящее время существует потребность в создании относительно простых, по возможности автономных, надежных, высокопроизводительных и экономичных технологий разрушения и разделения материалов. Этим требованиям вполне удовлетворяют разрабатываемые и используемые в последнее время взрывные методы воздействия на различные материалы [1, 2]. Однако такие методы имеют существенный недостаток: повышенную пожаро-, взрыво-, экологическую опасность. В связи с этим чрезвычайно важно, сохранив все преимущества импульсного высокоскоростного воздействия на материалы, перейти от использования традиционных химических взрывчатых веществ (ВВ), загрязняющих окружающую среду и небезопасных при транспортировке и хранении, например, к электрическому взрыву, не имеющему вредных экологических последствий.

Для решения этой задачи рассматривается ряд конкретных технологий электровзрывного или электродинамического воздействия на различные материалы и конструкции с целью их разрушения, дробления на мелкие фрагменты, отслоения одного материала от другого, высвобождения элементов конструкций из монолита материала. Ранее авторами были достаточно подробно исследованы возможности управления различными эффектами взрыва и высокоскоростного удара с помощью электромагнитных воздействий [3, 4]; поведение металлических кумулятивных струй при пропускании по ним импульсного электрического тока [5–7]; влияние магнитного по-

ля, создаваемого в кумулятивной облицовке, на функционирование кумулятивных зарядов [8–10]; возможность генерации сильных магнитных полей в проводящих материалах при проникании в них высокоскоростных тел и влияние этого эффекта на процесс проникания [11, 12].

Применение электрического взрыва для разрушения прочных и хрупких монолитных конструкций. На практике часто возникают задачи разрушения монолитных конструкций, расположенных вблизи зданий и сооружений (например, при демонтаже старых фундаментов на промышленных предприятиях). При использовании для этих целей ВВ требуются специальные меры защиты (экологическая и производственная безопасность) и, кроме того, возникают трудности, обусловленные организацией доставки и хранения ВВ.

В связи с этим авторами был исследован вопрос о возможности разрушения монолитных конструкций, изготавливаемых главным образом из бетона, с помощью электрического взрыва.

При электрическом взрыве в жидкой среде электрическая энергия преобразуется в механическую. Это преобразование, называемое электрогидравлическим эффектом (ЭГЭ), характеризуется тем, что в жидкости, находящейся в замкнутом объеме, при высоковольтном импульсном разряде в зоне его действия возникает высокое гидравлическое давление. Это давление приводит к разрушению неметаллических и пластическим деформациям металлических объектов, помещенных вблизи зоны разряда. В промышленности метод электрогидравлической штамповки, основанный на ЭГЭ, достаточно широко применяется для получения деталей из листовых тонкостенных заготовок [13].

В электрогидравлических устройствах жидкой средой, в которой осуществляется пробой промежутка между двумя электродами и образование канала разряда, обычно является техническая или водопроводная вода (рис. 1).

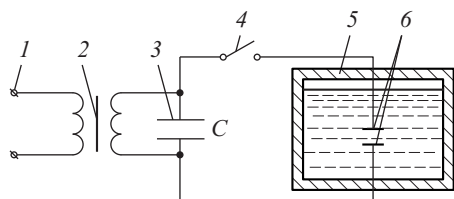


Рис. 1. Принципиальная схема установки для осуществления высоковольтных разрядов в жидкости: 1 — источник питания; 2 — трансформатор с выпрямительными устройствами; 3 — конденсаторная батарея; 4 — разрядник; 5 — технологический блок; 6 — рабочие электроды

При пуске установки происходит зарядка конденсаторной батареи, являющейся накопителем энергии. После срабатывания разрядника и подачи высокого напряжения на разрядный промежуток

(между двумя электродами) происходит пробой последнего. В результате пробоя в жидкости образуется токопроводящий канал разряда, частично заполненный ионизированным газом. На следующей стадии в канале разряда выделяется большая часть энергии, запасенной конденсаторной батареей. В результате быстрого нарастания мощности температура в канале разряда может достигать нескольких десятков тысяч градусов. Интенсивный разогрев плазмы разрядным током приводит к повышению давления и расширению канала разряда.

Благодаря малой сжимаемости жидкости давление внутри газопаровой полости достигает нескольких гигапаскалей. Рассмотренные процессы приводят к формированию в жидкости ударной волны (УВ), распространяющейся во всех направлениях от канала разряда. При встрече УВ с преградой последняя может либо деформироваться, если является пластичной, либо разрушиться, если обладает свойством хрупкости.

Для осуществления пробоя промежутка в воде прилагаемое к электродам напряжение должно составлять несколько десятков киловольт. При этом разряд через промежуток в жидкости характеризуется неустойчивостью, а выходную мощность трудно регулировать.

Чтобы облегчить управление формой и амплитудой генерируемых волн давления и повысить КПД искрового промежутка, электроды соединяют проводником, имеющим вид перемычки (мостика). Перемычку выполняют из тонкой проволоочки, свернув ее спиралью, или из фольги.

Наличие проволоочки позволяет увеличить длину разряда при одинаковых мощностях установки и рабочей среды. При разряде конденсатора через проволоочку превращение энергии происходит более эффективно, так как свободный разряд и испарение жидкости заменяются «ударным» испарением проволоочки. Это явление называют электрическим взрывом проводника. Применение взрывающейся проволоочки дает возможность снизить рабочее напряжение установки.

Процесс электрического взрыва проволоочки имеет несколько стадий. На первой стадии при прохождении электрического тока проволоочка нагревается до температуры плавления. Благодаря магнитным силам и силам инерции форма проволоочки сохраняется, а в результате дальнейшего поступления энергии ее температура повышается и становится больше температуры испарения металла.

В момент испарения проволоочки ее объем за время порядка 10 мкс взрывообразно увеличивается в $10^3 \dots 10^4$ раз. Первая стадия заканчивается переходом проволоочки в непроводящее состояние.

Вторая стадия — это пауза тока, которая длится до тех пор, пока плотность газа в расширяющемся после взрыва проволоочки канале разряда не упадет настолько, что окажется возможным пробой газа под действием оставшегося на конденсаторной батарее напряжения. Разряд по газовому каналу — третья стадия процесса.

С целью выявления возможности разрушения бетонных конструкций энергией электрического взрыва проводника в жидкости были проведены экспериментальные исследования (рис. 2). Разрушению подвергали неармированный бетонный блок 1 размером $0,5 \times 0,5$ м и толщиной 0,2 м. В центре блока был пробурен цилиндрический шпур диаметром около 30 мм на глубину, составлявшую примерно половину толщины блока. Шпур 2 заполняли водой, после этого в нем размещали электродную систему 3, с помощью которой осуществляли подвод электрического тока к взрывающейся проволочке 7, располагавшейся по оси шпура. Проволочка была медной, ее размеры (диаметр 0,5 мм и длина 50 мм) выбраны по рекомендациям, данным в работе [14].

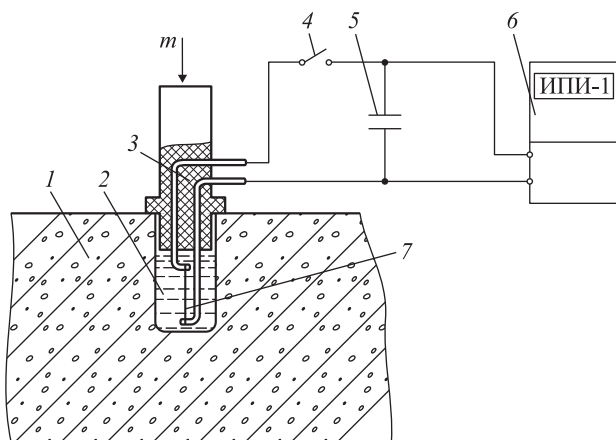


Рис. 2. Схема эксперимента по разрушению бетона при электрическом взрыве проводника:

1 — неармированный бетонный блок; 2 — шпур; 3 — электродная система; 4 — разрядный коммутатор; 5 — конденсаторная батарея; 6 — источник питания; 7 — взрывающаяся проволочка

Для предотвращения выброса жидкости из шпура при электрическом взрыве проволочки и, соответственно, быстрого сброса давления в шпуре электродная система 3 была выполнена таким образом, что плотно закрывала шпур со стороны лицевой поверхности бетонного блока. Помимо этого она нагружалась сверху дополнительной массой m .

В качестве накопителя электрической энергии использовали конденсаторную батарею 5 емкостью 100 мкФ, имеющую рабочее напряжение до 5 кВ. Максимальная запасаемая энергия батареи составляла около 30 кДж. Разряд батареи через проволочку происходил при срабатывании разрядного коммутатора 4. Заряжалась батарея от источника питания 6 типа ИПИ-1, обычно применяемого для зарядки накопительных емкостей лампы накачки лазеров.

В ходе проведенных экспериментов были зафиксированы следующие результаты. В связи с малым объемом шпура в отсутствие дополнительного нагружения массой m электродной системы происходил быстрый выброс жидкости из шпура без разрушения бетона. Достичь разрушения бетонного блока удалось, нагрузив электродную систему сверху массой $m \approx 20$ кг. Блок раскололся на отдельные достаточно крупные фрагменты, практически оставшиеся на месте, что свидетельствует об очень малой скорости их метания энергией электрического взрыва и позволяет не предпринимать специальных мер защиты.

Таким образом, была показана принципиальная возможность разрушения бетона энергией электрического взрыва. Повышение эффективности этой технологии может быть связано с оптимизацией характеристик процесса (размеры и расположение шпуров, энергия и форма токового разряда и т. д.). К явным недостаткам предложенной технологии следует отнести большую трудоемкость предварительного образования шпуров.

Рассмотренное техническое решение представляется весьма перспективным с точки зрения актуальности стоящих задач и возможности разработки экологически чистой технологии разрушения прочных и хрупких монолитных конструкций (например, из бетона). Может быть разработана передвижная установка с автономным источником питания, позволяющая оперативно проводить соответствующие работы в труднодоступных и удаленных местах, а также в густонаселенных районах или непосредственно на промышленных объектах без принятия существенных мер предосторожности.

Разрушение массивов из непроводящих материалов, имеющих в своем составе элементы, являющиеся хорошими проводниками электрического тока. Примером такого массива материала является армированный бетон. Достаточно эффективным методом разрушения подобных конструкций может оказаться создание электродинамических сил между токопроводящими элементами посредством пропускания по ним импульсного электрического тока.

При пропускании электрического тока противоположного направления по двум достаточно близко расположенным проводникам, находящимся в массиве непроводящего материала (например, по параллельным прутьям арматуры в железобетоне), между проводниками возникают пондеромоторные силы (силы Ампера), которые при достаточной силе тока могут привести к раскалыванию материала.

Подобный способ создания электродинамических сил между токопроводящими элементами для разрушения материалов может быть весьма эффективно использован, например, при демонтаже выработавших свой ресурс ванн для электролиза алюминия, при очистке поверхностей различных деталей и конструкций, демонтаже железобетонных свай и в ряде других случаев.

Рассмотрим более подробно технологию возможного способа демонтажа выработавших ресурс ванн для промышленного электролиза алюминия. На верхней поверхности подины, представляющей собой набор катодных секций электролизера, после выработки им ресурса, как правило, остается прочное покрытие — смесь застывшего алюминия и глинозема. Демонтаж выработавших ресурс электролизеров и их дальнейшее восстановление — важная составная часть технологического процесса массового производства алюминия. При этом прежде всего необходимо высвободить основные токопроводящие элементы, представляющие собой стальные катодные стержни (блумсы): встряхнуть подину и разрыхлить графитовый наполнитель, затем извлечь и удалить блумсы.

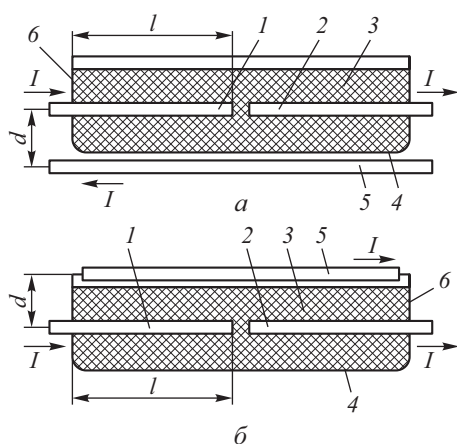


Рис. 3. Схема демонтажа электролизных ванн:

а — встречное протекание электрического тока; *б* — протекание электрического тока в одном направлении; 1, 2 — блумсы; 3 — подина; 4 — дно электролизной ванны; 5 — дополнительный проводник — «спутник»; 6 — стенка электролизной ванны

На рис. 3 показана схема возможного способа демонтажа электролизных ванн [15]. Высвобождение блумсов 1, 2 из подины 3, последующее удаление наполнителя и извлечение блумсов осуществляются посредством пропускания электрического тока через основной проводник, в качестве которого выбирают пару противоположных блумсов, и продольно размещаемый дополнительный проводник — «спутник» 5. При этом дополнительный проводник — «спутник» устанавливают либо под дном 4 электролизной ванны, обеспечивая встречное протекание электрического тока по нему и по основному проводнику (см. рис. 3, *а*), либо над подиной, обеспечивая протекание тока в одном направлении (см. рис. 3, *б*). Пара противоположных блумсов и дополнительный проводник — «спутник» могут быть включены в единую электрическую цепь соответственно последовательно или параллельно. В обоих случаях на блумсы действует электромагнитная сила Ампера [16], направленная в сторону свободной поверхности подины высвобождающая («выламываю-

щая») блюмсы из подины, а при достаточно большом токе — обеспечивающая их частичное извлечение.

Принципиальная возможность реализации разрушения материала посредством воздействия электродинамических сил на проводящие элементы, расположенные в его толще, была подтверждена проведенными расчетными оценками и лабораторным экспериментом.

Согласно схеме, показанной на рис. 3, при пропускании тока I через пару противоположных блюмсов 1, 2 и дополнительный проводник — «спутник» на блюмс 1 длиной l действует сила Ампера

$$F = \frac{\mu_0 I^2 l}{2\pi d}$$

(где μ_0 — магнитная постоянная), создающая в месте заделки блюмса на расстоянии l момент

$$M_I = F \frac{l}{2} = \frac{\mu_0 I^2 l^2}{4\pi d}.$$

Необходимое для высвобождения блюмса l значение силы тока I может быть определено из условия равенства момента Ампера M_I и момента M_P , создаваемого силой тяги P подъемного крана при извлечении блюмсов известным способом: $M_P = Pl$.

При $P \sim 5 \cdot 10^5$ Н, $l \sim 2,5$ м, $d \sim 0,5$ м, $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ Гн/м необходимая сила тока оценивается значением $I \sim 1000$ кА, сильно завышенным, в частности, по той причине, что 150-тонный подъемный кран, в практике производства извлекающий одновременно три блюмса, работает с существенным коэффициентом запаса. Более точные оценки показывают, что эффективное высвобождение блюмсов из подины посредством ее встряхивания и разрыхления наполнителя достигается при значении силы тока $I \sim 150$ кА. Это соответствует штатным значениям, обеспечиваемым энергетическим оборудованием электролизных цехов. Расчеты показывают, что ток силой $I \sim 150$ кА допускается пропускать через проводники, блюмсы которых имеют характерные при электролизе размеры в течение нескольких десятков секунд. Этого достаточно для эффективной диффузии создаваемого дополнительным проводником — «спутником» — магнитного поля через относительно тонкое проводящее дно ванны и проводящий материал наполнителя, а также для последующего высвобождения блюмсов из подины в результате взаимодействия протекающего по ним тока с магнитным полем.

Помимо расчетных оценок для подтверждения работоспособности предлагаемой технологии разрушения материалов были проведе-

ны лабораторные эксперименты. В опытах использовали медную шину шириной 5 мм, согнутую в виде буквы П и залитую эпоксидной смолой. Блок затвердевшей смолы имел форму прямоугольного параллелепипеда и размеры 150×40×20 мм. Расстояние между противоположными сторонами шины, залитыми смолой, составляло 10 мм. При разряде конденсаторной батареи через шину блок эпоксидной смолы разрушился на несколько крупных фрагментов практически с полным высвобождением шины.

Предлагаемый способ демонтажа электролизных ванн позволит существенно повысить производительность демонтажа и дальнейшего восстановления, а также снизить затраты на эти операции. Дополнительный положительный эффект состоит в том, что при таком способе максимально используются энергетические мощности и энергетическое оборудование электролизных цехов.

Применение методов магнитно-импульсной обработки для разрушения массивов различных материалов. Поскольку подвергаемые разрушению или дроблению материалы (например, бетон, горные породы и т. п.) являются непроводящими, в качестве «передаточного звена» в данных случаях необходимо использовать материалы высокой проводимости. Приобретая запас кинетической энергии под действием магнитного поля, эти материалы при последующем ударе должны передать полученную энергию разрушаемому массиву.

Известно, что в основе магнитно-импульсной обработки лежит явление электромагнитной индукции: при создании в области пространства у поверхности проводящего материала импульса магнитного поля в последнем индуцируются вихревые электрические токи [16, 17]. В результате взаимодействия этих токов с магнитным полем возникают пондеромоторные силы (силы Ампера), которые и обеспечивают необходимое формоизменение заготовки.

Это явление может быть использовано для разрушения материалов. Например, если в массиве материала предварительно пробурить шпур, а затем воздействовать на стенки шпура импульсным магнитным давлением, возникающим при разряде конденсаторной батареи через помещенный в шпуре индуктор и передаваемым с помощью охватывающей индуктор тонкостенной оболочки из материала высокой проводимости (например, алюминия), то можно достаточно эффективно разрушить массив материала. Этот метод более эффективен, чем осуществление рассмотренного в начале статьи обычного электрического взрыва в жидкости (см. рис. 1, 2), однако имеет тот же недостаток — необходимость предварительного образования шпуров в разрушаемом материале существенно повышает трудоемкость технологии.

Избежать этого недостатка можно, применив способ разрушения массива материала ударом по его свободной поверхности металличе-

ской пластиной, разогнанной импульсным магнитным полем [18]. При разряде конденсаторной батареи через плоский спиральный индуктор размещенная в непосредственной близости от него металлическая пластина разгоняется и ударяет по массиву материала (рис. 4). При этом индуктор создает импульсное магнитное поле, индуцирующее вихревые электрические токи в расположенной над ним пластине. Взаимодействие этих токов с магнитным полем индуктора и создает ускоряющую силу. Скорость, приобретаемая пластиной под действием импульсного магнитного поля, как показывают оценки, может достигать нескольких сот метров в секунду [19, 20].

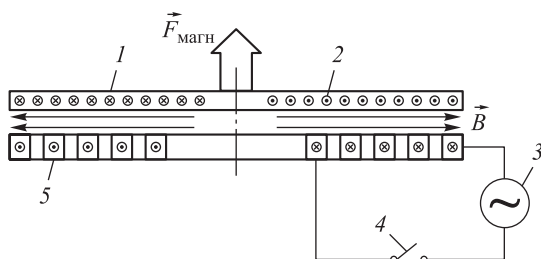


Рис. 4. Схема магнитно-импульсного метания металлических пластин:

1 — металлическая пластина; 2 — индукционные токи; 3 — источник электрической энергии; 4 — коммутатор; 5 — плоский спиральный индуктор; $\vec{F}_{\text{магн}}$ — электромагнитная сила;

\vec{B} — индукция магнитного поля

Проведенные на начальном этапе исследований лабораторные эксперименты по разрушению неармированного бетонного блока размером $50 \times 50 \times 50$ см, в ходе которых для разгона ударника, имеющего форму толстой пластины толщиной 8 мм и размером 80×50 мм, на пластину наносили тонкий слой ВВ, показали весьма высокую эффективность такой технологии разрушения. Фугасное действие взрыва в этих экспериментах при создании условий, соответствующих электромагнитному метанию, заведомо исключалось вследствие достаточно большого удаления пластины от разрушаемого блока. Скорость метания пластины при этом достигала 300 м/с.

Эксперименты показали, что удар пластиной, разогнанной до большой скорости, может быть эффективно использован, например, при очистке массивных стальных стержней от чугунного покрытия.

Дальнейшие исследования применения высокоскоростного удара для разрушения материалов были направлены на выяснение возможности разгона ударников до скоростей в несколько сот метров в секунду

посредством воздействия импульсного магнитного поля. Основной экспериментальной энергетической метательной установки является конденсаторная батарея, взаимосвязанная с плоским спиральным индуктором. Металлический ударник в форме пластины располагается над одним из торцов индуктора с небольшим зазором. При срабатывании разрядного коммутатора в электрической цепи начинает протекать импульсный электрический ток и в зазоре между индуктором и пластиной возникает магнитное поле, разгоняющее пластину.

Одна из основных проблем, возникающих при практической реализации магнитно-импульсного метания пластин и существенно снижающих конкурентоспособность этого способа разгона по сравнению со взрывным метанием, связана с габаритно-массовыми характеристиками источника электрической энергии — для достижения скорости метания 1 км/с пластин, имеющих характерную массу порядка 1 кг, требуется источник энергии весьма больших размеров. В связи с этим актуальна задача минимизации потерь энергии при преобразовании электрической энергии источника в кинетическую энергию пластины. Ключевым моментом, определяющим эффективность процесса электромагнитного ускорения пластины, является создание оптимальных условий для преобразования электрической энергии, первоначально запасенной в накопителе, в кинетическую энергию движения пластины.

Для оценки указанных особенностей и определения условий эффективной передачи энергии была разработана методика расчета системы электромагнитного метания [21, 22]. За основу в методике принят подход, используемый для расчета параметров магнитно-импульсных технологических установок и режимов магнитно-импульсной обработки металлов при магнитно-импульсной штамповке, модифицированный в части, касающейся определения закона набора скорости пластиной. Методика базируется на конечных соотношениях закона сохранения энергии, теории переходных процессов в электрических цепях, расчета эквивалентных индуктивностей и активных сопротивлений двухконтурных систем.

На основании разработанной методики были проведены расчеты электромагнитного метания алюминиевых и стальных пластин применительно к параметрам существующей экспериментальной установки. В ходе расчетов исследовалось влияние на эффективность метания пластин соотношения индуктивности системы индуктор — пластина и собственной индуктивности разрядной цепи энергетической установки, начального зазора между индуктором и пластиной, параметров конденсаторной батареи (емкости и напряжения) при фиксированном значении ее энергии.

В качестве примера на рис. 5 приведены зависимости индуктивности системы индуктор — пластина от зазора x , полученные на основании численных расчетов и аппроксимирующего соотношения [19]:

$$L(x) = L_c + L_0[1 - \exp(-x/x_0)], \quad (1)$$

где $L(x)$ — общая индуктивность системы; L_c — индуктивность системы индуктор — пластина при нулевом зазоре между ними; L_0 — базовое значение переменной составляющей индуктивности; x — зазор между индуктором и пластиной; x_0 — базовый линейный масштаб области изменения индуктивности.

Параметры системы индуктор — пластина (рис. 6): внешний радиус индуктора $R_{\text{внеш}} = 100$ мм; внутренний радиус индуктора $R_{\text{внутр}} = 40$ мм; радиус пластины $R_{\text{п}} = 100$ мм; толщина витка индуктора $h = 5$ мм; ширина витка индуктора $b = 4$ мм; число витков $n = 8$; толщина пластины $h_{\text{п}} = 10$ мм (значение x_0 при построении аппроксимации составляло 20 мм).

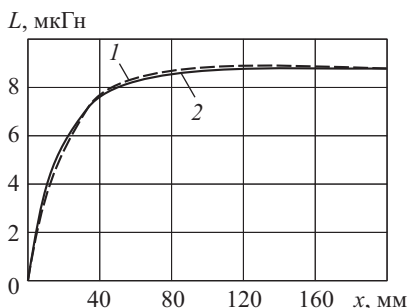


Рис. 5. Зависимость индуктивности системы индуктор — пластина от зазора между ними:

1 — аппроксимация; 2 — численный расчет

Расчеты, проведенные при варьировании параметров системы индуктор — пластина, позволили сделать следующие выводы. В том случае, когда внешний радиус индуктора не превышает радиус пластины ($R_{\text{п}} \geq R_{\text{внеш}}$, см. рис. 6), значение индуктивности системы при нулевом зазоре $L_c \approx 0$ ($L_c \ll L_0$, при этом базовое значение переменной составляющей индуктивности близко к индуктивности уединенного индуктора $L_0 \approx L_{\text{и}}$). Уменьшение радиуса пластины (по отношению к внешнему радиусу индуктора) ведет к увеличению значения L_c (в пределе при очень малых радиусах пластины значение L_c стремится к значению индуктивности уединенного индуктора $L_{\text{и}}$, базовое значение переменной составляющей индуктивности L_0 при этом стремится к нулю).

Значение $L_{\text{и}}$ зависит главным образом от внешнего радиуса индуктора и числа витков, возрастая с их увеличением. Что же касается базового линейного масштаба участка разгона пластины x_0 , то, как оказалось, он определяется практически лишь внешним радиусом ин-

дуктора и составляет $x_{\sigma} \approx 0,2 R_{\text{внеш}}$ (отклонения от этого значения при изменении в широком диапазоне параметров системы индуктор — пластина не превышали 10...15 %).

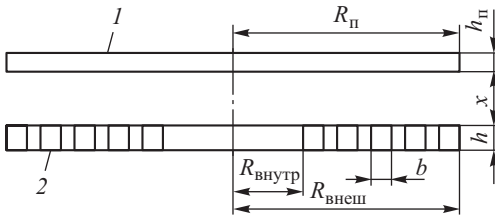


Рис. 6. Расчетная схема метания пластины плоским индуктором и геометрические характеристики системы:
1 — пластина; 2 — индуктор

С практической точки зрения наибольший интерес представляет анализ системы электромагнитного метания, где в качестве источника электрической энергии используется конденсаторная батарея. Уравнения, описывающие функционирование такой системы (в пренебрежении электрическим сопротивлением материалов пластины и числом витков индуктора) имеют достаточно громоздкий вид [19]. Систему соотношений интегрировали численно. Тестирование разработанной модели и расчетной методики определения параметров электромагнитного метания пластин индуктором было проведено с использованием экспериментальных данных [20], полученных на лабораторной установке с конденсаторной батареей емкостью 1,8 мФ и начальным напряжением 5 кВ (запасаемая энергия 22,5 кДж). При метании алюминиевой пластины диаметром 208 мм и массой 0,52 кг на этой установке достигалась скорость 175 м/с. Было получено хорошее соответствие результатов расчетов с экспериментальными данными как по конечной скорости метания пластины, так и по характеру изменения тока в разрядной цепи.

На основании разработанной методики были проведены расчеты параметров системы электромагнитного метания, влияющих на эффективность магнитно-импульсного ускорения пластин, в качестве источника электрической энергии в системе используется конденсаторная батарея. Определяющий параметр такой системы — безразмерный параметр, характеризующий время разряда емкостного накопителя:

$$\bar{T} = \frac{\sqrt{C(L_c + L_{\sigma})}}{t_{\sigma}} = \frac{1}{x_{\sigma}} \sqrt{\frac{2W_0 C(L_c + L_{\sigma})}{m}}, \quad (2)$$

где C — емкость конденсаторной батареи; m — масса пластины; $t_{\sigma} = x_{\sigma}/v_{\text{max}}$ — время пролета пластиной со скоростью v_{max} базы разгона x_{σ} ; $v_{\text{max}} = \sqrt{2W_0/m}$ — максимально возможная скорость пла-

стины при условии, что вся введенная в систему энергия W_0 преобразуется в кинетическую энергию пластины; остальные обозначения указаны ранее (см. формулу (1), рис. 6).

На рис. 7 показано влияние параметра \bar{T} на конечную скорость пластины $\bar{v}_k = v_k/v_{\max}$ и КПД системы электромагнитного метания $\eta = mv_k^2/(2W_0) = \bar{v}_k^2$ при различных значениях параметров \bar{x}_0 и \bar{L}_c . При этом $\bar{v}_k = \exp(-\bar{x}_0)/(L_c + 1)$; x_0 — начальный зазор между пластиной и индуктором; $\bar{x}_0 = x_0/x_6$; $\bar{L}_c = L_c/L_6$.

Из формулы для КПД η системы электромагнитного метания ясно, что полное преобразование мгновенно введенной в систему индуктор — пластина энергии в кинетическую энергию пластины возможно при условии $\bar{x}_0 = 0$, $\bar{L}_c = 0$. Очевидно, что добиться на практике в точности нулевого значения параметров \bar{x}_0 и \bar{L}_c невозможно, поскольку между пластиной и индуктором всегда будет существовать небольшой начальный зазор x_0 (определяемый, например, толщиной диэлектрического материала, изолирующего витки индуктора), а значение индуктивности L_c системы индуктор — пластина при нулевом зазоре в реальной разрядной цепи будет включать индуктивность токоподвода от источника электрической энергии к индуктору. Указанное соотношение для КПД позволяет прогнозировать степень снижения эффективности магнитно-импульсного ускорения при реализуемых в системе параметрах \bar{x}_0 и \bar{L}_c .

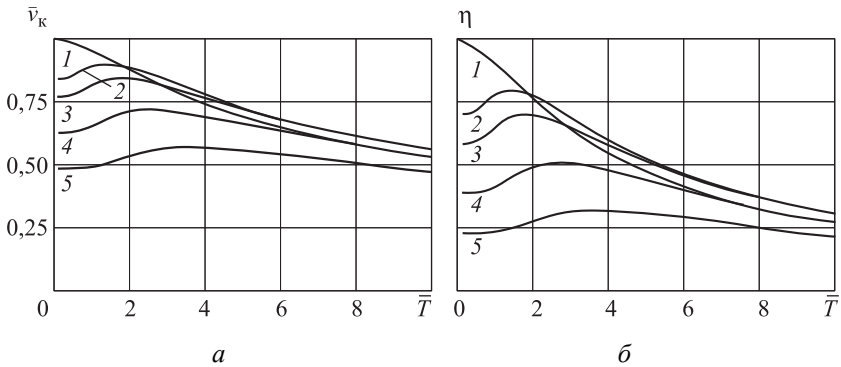


Рис. 7. Влияние безразмерного времени разряда емкостного накопителя на конечную скорость пластины и КПД:

1 — $\bar{x}_0 = 0$; $\bar{L}_c = 0$; 2 — $\bar{x}_0 = 0,05$; $\bar{L}_c = 0,05$; 3 — $\bar{x}_0 = 0,1$; $\bar{L}_c = 0,1$;
4 — $\bar{x}_0 = 0,25$; $\bar{L}_c = 0,25$; 5 — $\bar{x}_0 = 0,5$; $\bar{L}_c = 0,5$

Представленные на рис. 7 данные свидетельствуют, что существует оптимальное значение параметра \bar{T} , при котором обеспечивается максимальная эффективность преобразования энергии емкостного накопителя в кинетическую энергию пластины. При увеличении значений параметров \bar{x}_0 и \bar{L}_c оптимальное значение \bar{T} смещается в сторону увеличения при одновременном снижении максимума конечной скорости пластины.

Заключение. В рамках предложенной методики были проведены расчеты оптимальных параметров плоских спиральных индукторов, используемых для метания пластин. В качестве оптимальных выделены индукторы с максимально возможной индуктивностью (увеличение индуктивности системы индуктор — пластина способствует увеличению доли передаваемой этой системе магнитной энергии, расходуемой на разгон пластины, снижению активных потерь в разрядной цепи, увеличению времени воздействия магнитного поля на метаемую пластину). В качестве ограничителя индуктивности выступает степень проникания магнитного поля в пластину (с увеличением индуктивности уменьшается рабочая частота разрядного контура системы и соответственно снижается темп нарастания магнитного поля, что может привести к проявлению эффекта его проникания в результате диффузии через метаемую пластину в процессе ее разгона и ослабить силовое воздействие на пластину).

В результате расчетов, проведенных по разработанной методике, выявлено существование оптимального начального зазора между плоскостью витков индуктора и метаемой пластиной. Установлено, что при увеличении зазора, с одной стороны, уменьшаются энергетические потери в цепи вследствие увеличения ее общей индуктивности, а с другой — возрастают потери магнитной энергии на нерабочей торцевой части индуктора. Необходимо отметить, что существование оптимального зазора обнаруживается только при учете конечной проводимости материалов индуктора и пластины, в случае идеальной проводимости материалов скорость метания с увеличением начального зазора монотонно падает.

Анализируя проведенные исследования в целом, следует отметить, что они подтвердили принципиальную возможность электромагнитного разгона ударников до скоростей, достаточных для эффективного разрушения материалов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ладов С.В. Использование взрывных технологий в народном хозяйстве для решения конверсионных задач. *Двойные технологии*, 1998, № 2, с. 31–61.
- [2] Селиванов В.В., Кобылкин И.Ф., Новиков С.А. *Взрывные технологии*. 2-е изд. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 529 с.

- [3] Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В., Швецов Г.А., Матросов А.Д. О возможностях управления кумулятивным эффектом взрыва с помощью электромагнитных воздействий. *Физика горения и взрыва*, 2000, т. 36, № 6, с. 126–145.
- [4] Shvetsov G.A., Matrosov A.D., Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. Effect of External Magnetic Fields on Shaped-Charge Operation. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, № 6, pp. 521–526.
- [5] Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В., Швецов Г.А., Матросов А.Д. Поведение металлических кумулятивных струй при пропускании по ним импульсного электрического тока. *Прикладная механика и техническая физика*, 2000, т. 41, № 3, с. 19–25.
- [6] Федоров С.В. Об эффекте рассеивания металлических кумулятивных струй при пропускании по ним мощного импульса электрического тока. *Журнал технической физики*, 2012, т. 82, № 10, с. 18–30.
- [7] Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В., Швецов Г.А., Матросов А.Д. Прогнозирование пробивной способности металлических кумулятивных струй при пропускании по ним мощного импульса электрического тока. *Журнал технической физики*, 2003, т. 73, № 7, с. 28–36.
- [8] Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. О влиянии магнитного поля, создаваемого в облицовке кумулятивного заряда, на его пробивное действие. *Физика горения и взрыва*, 1999, т. 35, № 5, с. 145–146.
- [9] Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В., Швецов Г.А., Матросов А.Д. О возможности снижения пробивного действия кумулятивных зарядов в магнитном поле. *Прикладная механика и техническая физика*, 2007, т. 48, № 3, с. 112–120.
- [10] Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. Проявление магнитокумулятивного эффекта при взрыве кумулятивного заряда с созданным в его облицовке аксиальным магнитным полем. *Журнал технической физики*, 2003, т. 73, № 8, с. 111–117.
- [11] Федоров С.В., Бабкин А.В., Колпаков В.И. О возможности генерации сильных магнитных полей в проводящих материалах при проникании в них высокоскоростных тел. *Прикладная механика и техническая физика*, 2000, т. 41, № 3, с. 13–18.
- [12] Федоров С.В. О генерации магнитного поля в области сдвигового деформирования проводящего материала при высокоскоростном проникании. *Прикладная механика и техническая физика*, 2001, т. 42, № 3, с. 15–23.
- [13] Ракошиц Г.С. *Электроимпульсная штамповка*. Москва, Высшая школа, 1990, 191 с.
- [14] Волосатов В.А., ред. *Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки*. Ленинград, Машиностроение, 1988, 191 с.
- [15] Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В., Головачев А.В., Кружков В.А. *Способ демонтажа электролизных ванн*. Патент 2039130 Российская Федерация, кл. C25C3/10, заявл. 15.05.1993, опубл. 09.07.1995, бюл. № 19.
- [16] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Электродинамика сплошных сред*. Москва, Наука, 1982, 624 с.
- [17] Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. *Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов*. Харьков, Изд-во ХГУ, 1977, 168 с.
- [18] Татмышевский К.В., Семенович М.Л., Козлов С.А. Магнитно-импульсные метательные установки для проведения ударных испытаний взрывательных устройств боеприпасов и средств бронезащиты. *Известия*

Российской академии ракетных и артиллерийских наук, 2005, вып. 4 (45), с. 22–31.

- [19] Бабкин А.В., Велданов В.А., Ладов С.В., Федоров С.В. Об ускорении металлических пластин импульсным магнитным полем. *Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Тр. Межд. конф. «XI Харитоновские тематические научные чтения»*. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009, с. 551–559.
- [20] Babkin A.V., Fedorov S.V., Ladov S.V., Grigoryan V.A., Kruzhhkov V.A., Sherbakov A.V. Theoretical and experimental investigation of magnetic-impulse plate acceleration. *Proc. of the VIIIth Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics*. Tallahassee, Florida, USA, 1998, p. 345–348.
- [21] Ладов С.В., Федоров С.В. Расчетный анализ электромагнитного метания металлических пластин для систем защиты объектов. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2010, вып. 4 (66), с. 69–78.
- [22] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. Theoretical analysis of system of electromagnetic acceleration of metal plates. *Proc. 25th Int. Symp. On Ballistics*. Beijing, China, 2010, vol. 1, p. 638–646.

Статья поступила в редакцию 19.01.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В. Технологии разрушения и разделения материалов на основе электродинамических воздействий. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 2.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/tempp/1371.html>

Бабкин Александр Викторович родился в 1954 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1978 г. Д-р техн. наук, чл.-кор. РАЕН, профессор кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области численного моделирования явлений физики взрыва и высокоскоростного удара. e-mail: pc-os@bmstu.ru

Ладов Сергей Вячеславович родился в 1949 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1972 г. Канд. техн. наук, чл.-кор. РАЕН, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 300 научных работ в области физики взрыва. e-mail: sm4-2009@mail.ru

Федоров Сергей Владимирович родился в 1964 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1987 г. и МГУ им. М.В. Ломоносова в 1992 г. Старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 250 научных работ в области физики взрыва и высокоскоростного удара. e-mail: sergfed-64@mail.ru

Technologies of material destruction and separation based on electrodynamic effects

© A.V. Babkin, S.V. Ladov, S.V. Fedorov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

We consider the possibility of using technologies of material destruction and separation based on the electrodynamic effects. The first technology is based on electromagnetic effects related to the electric explosion in a liquid medium. The second technology is generation of electrodynamic forces between conductive elements by passing pulsed electric current. The third technology is based on using methods of magnetic pulse material treatment, in particular, throwing metal plate overclocked by pulsed magnetic field. Proposed technologies may replace tradition explosive technologies using chemical explosives the effect of which pollutes the environment and which are not safe to transport and store.

Keywords: technology, destruction of materials, electric explosion, electrodynamic impact, electromagnetic throwing.

REFERENCES

- [1] Ladov S.V. *Dvoynyeologii – Dual-Use Technologies*, 1998, no. 2, pp. 31–61.
- [2] Selivanov V.V., Kobylkin I.F., Novikov S.A. *Vzryvnyeologii* [Blasting Technologies]. Moscow, BMSTU Publ., 2014, 529 p.
- [3] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V., Shvetsov G.A., Matrosov A.D. *Fizika Goreniya i Vzryva – Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2000, vol. 36, no. 6, pp. 792–808 [In Russian: pp. 126–145].
- [4] Shvetsov G.A., Matrosov A.D., Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. Effect of External Magnetic Fields on Shaped-Charge Operation. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, no. 6, pp. 521–526.
- [5] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V., Shvetsov G.A., Matrosov A.D. *Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2000, vol. 41, no. 3, p. 394 [In Russian: pp. 19–25].
- [6] Fedorov S.V. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki – Technical Physics*, 2012, vol. 57, no. 10, pp. 1341–1352 [In Russian: vol. 82, no. 10, pp. 18–30].
- [7] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V., et al. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki – Technical Physics*, 2003, vol. 48, no. 7, pp. 829–836 [In Russian: vol. 73, no. 7, pp. 28–36].
- [8] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. *Fizika Goreniya i Vzryva – Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1999, vol. 35, no. 5, pp. 598–599 [In Russian: pp. 145–146].
- [9] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V., Shvetsov G.A., Matrosov A.D. *Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2007, vol. 48, no. 3, pp. 393–400 [In Russian: pp. 112–120].
- [10] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki – Technical Physics*, 2003, vol. 48, no. 8, pp. 1047–1052 [In Russian: vol. 73, no. 8, pp. 111–117].

- [11] Fedorov S.V., Babkin A.V., Kolpakov V.I. *Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2000, vol. 41, no. 3, p. 389 [In Russian: pp. 13–18].
- [12] Fedorov S.V. *Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2001, vol. 42, no. 3, pp. 397–403 [In Russian: pp. 15–23].
- [13] Rakoshits G.S. *Electroimpulsnaya shtampovka* [Spark-Discharge Forming]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990, 191 p.
- [14] Volosatov V.A., ed. *Spravochnik po electrokhimicheskim i electrofizicheskim metodam obrabotki* [Handbook on Electrochemical and Electrical Methods of Processing]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1988, 191 p.
- [15] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V., Golovachiov A.V., Kruzhkov V.A. *Sposob demontazha elektroliznykh vann* [The Method of Electrolysis Bath Dismantling] Patent RU 2039130, bull. 19, publ. 09.07.1995.
- [16] Landau L.D., Lifshits E.M. *Electrodinamica sploshnykh sred* [Electrodynamics of Continuum]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 624 p.
- [17] Belyi I.V., Fertik S.M., Himenko L.T. *Spravochnik po magnitoimpulsnoy obrabotke metallov* [Handbook on Magnetic Pulse Metal Treatment]. Kharkov, KhGU Publ., 1977, 168 p.
- [18] Tatmyshevskiy K.V., Semenovich M.L., Kozlov S.A. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk – Proceedings of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences*, 2005, issue. 4 (45), pp. 22–31.
- [19] Babkin A.V., Veldanov V.A., Ladov S.V., Fedorov S.V. Ob uskorenii metallicheskiykh platin impulsnym magnitnym polem [On the acceleration of the metallic plates by pulsed electromagnetic field]. *Ekstremalnye sostoyaniya beschestva. Detonatsiya. Udarnye volny* [Extreme states of matter. Detonation. Shock waves]. *Proceedings of the International Conference «XI Kharitonovskie topical scientific readings»*. Sarov, RFYaTs-VNIIEF Publ., 2009, pp. 551–559.
- [20] Babkin A.V., Fedorov S.V., Ladov S.V., Grigoryan V.A., Kruzhkov V.A., Scherbakov A.V. Theoretical and experimental investigation of magnetic-impulse plate acceleration. *Proceedings of the VIII International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics*. Tallahassee, Florida, USA, 1998, pp. 345–348.
- [21] Ladov S.V., Fedorov S.V. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk – Proceedings of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences*, 2010, issue. 4, pp. 69–78.
- [22] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. Theoretical analysis of system of electromagnetic acceleration of metal plates. *Proceedings of the 25th International Symposium on Ballistics*. Beijing, China, 2010, vol. 1, pp. 638–646.

Babkin A.V. (b. 1954) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1978. Dr. Sci. (Eng.), Associate Member of RANS, professor at the Department of High-Precision Airborne Devices at Bauman Moscow State Technical University. The author of more than 200 publications in the field of numerical modeling of explosion physics and high-speed impact. e-mail: pc-os@bmstu.ru

Ladov S.V. (b. 1949) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1972. Ph.D. (Eng.), Associate Member of RANS, associate professor at the Department of High-Precision Airborne Devices at Bauman Moscow State Technical University. The author of more than 300 publications in the field of explosion physics. e-mail: sm4-2009@mail.ru

Fedorov S.V. (b. 1964) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1987 and Lomonosov Moscow State University in 1992. Senior lecturer at the Department of High-Precision Airborne Devices at Bauman Moscow State Technical University. The author of more than 250 publications in the field of physics of explosion and high-speed impact. e-mail: sergfed-64@mail.ru