

УДК 621.373:621.316.549

## СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ МЕГААМПЕРНОГО ИМПУЛЬСА ТОКА ДЛЯ РАЗГОНА ЛАЙНЕРА МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

П. В. Дудай, А. А. Зименков, В. А. Иванов, А. И. Краев,  
С. В. Пак, А. Н. Скобелев, А. Ю. Февралев

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
607188 Саров, Россия

E-mails: duday@elph.vniief.ru, zimenkov@elph.vniief.ru, viivanov@elph.vniief.ru,

krayev@elph.vniief.ru, svpak@elph.vniief.ru, anskobelev@elph.vniief.ru,

ayfevralelev@elph.vniief.ru

Описаны способ формирования в лайнерной нагрузке импульса тока мегаамперного уровня трапецеидальной формы с заданными амплитудой и длительностью и устройство для его реализации. С использованием экспериментального устройства, представляющего собой источник тока на основе спирального взрывомагнитного генератора, в лайнерной нагрузке получен импульс тока амплитудой  $\approx 10$  МА с регулируемой длительностью и временами нарастания и спада тока. Применение данного источника для разгона лайнеров позволяет исследовать механизмы разрушения материалов в цилиндрической, сходящейся к оси геометрии. В данной постановке в экспериментах могут возникать дополнительные повреждения вследствие неоднородности условий нагружения.

Ключевые слова: мегаамперный импульсный источник тока, взрывной размыкатель, взрывомагнитный генератор.

**Введение.** При исследовании реологических свойств конструкционных материалов используются различные способы создания в них динамических нагрузок: соударение, контактный взрыв взрывчатого вещества (ВВ), импульсный нагрев и т. п. [1, 2]. Наличие разнообразных источников импульсной мощности на основе взрывомагнитных генераторов, разработанных во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики, позволяет изучать поведение материалов при осесимметричном ударно-волновом и близком к изоэнтропическому нагружении в большом диапазоне значений амплитудно-временных характеристик импульсов сжатия и растяжения. В частности, использование метода соударения с разгоном ударника за счет давления электромагнитного поля предоставляет возможность более полно изучить сжимаемость, сдвиговую и отклонную прочность, компактирование, напыление конструкционных материалов. В настоящее время созданы взрывомагнитные генераторы (ВМГ) с запасаемой энергией до 100 МДж [3]. Разрыв контура ВМГ с последующим подключением нагрузки к разрываемому участку цепи позволяет осуществлять быстрый вывод энергии из ВМГ в нагрузку. Кроме того, созданы взрывные размыкатели тока (ВРТ), позволяющие осуществлять вывод энергии

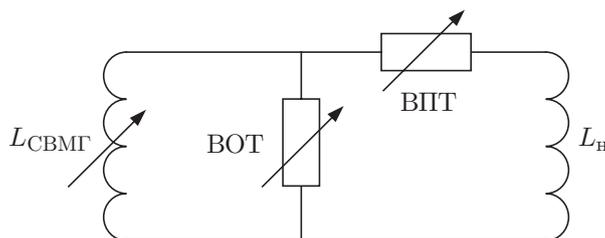


Рис. 1. Электрическая схема устройства

из ВМГ в нагрузку за время порядка  $10^{-6}$  с [4, 5]. Работа ВРТ основана на разрушении металлической фольги, метаемой на ребристую диэлектрическую преграду с помощью заряда ВВ, или на разрезании фольги диэлектрическими кумулятивными струями.

**Постановка задачи.** При исследовании реологических свойств конструкционных материалов с помощью ударного нагружения образцов в результате торможения ускоренного магнитным полем лайнера необходимо учитывать форму импульса тока в лайнере, которая определяет режим нагружения. При ускорении лайнера импульсом тока, сформированным традиционным способом (с использованием только обострителя тока), и последующем его торможении ток продолжает течь по лайнеру и сжимает образец из исследуемого материала, что приводит к схлопыванию образовавшихся откольных полостей и невозможности их обнаружения. Поэтому получение информации о зарождении, развитии, полном или частичном компактировании откольного повреждения существенно затруднено и необходимо использовать другой способ формирования импульса тока с требуемыми амплитудой и длительностью, позволяющий контролировать воздействие магнитного поля на ускоряемый лайнер-ударник для реализации различных режимов нагружения образцов.

**Схема импульсного источника тока.** Для создания в лайнерной нагрузке импульса тока с заданными амплитудно-временными характеристиками авторами данной работы предложен способ, заключающийся в применении двух взрывных размыкателей тока. Для формирования переднего фронта импульса тока, воздействующего на лайнер, используется взрывной обостритель тока (ВОТ), а взрывной прерыватель тока (ВПТ), последовательно включенный в электрический контур лайнера, обеспечивает длительность импульса тока и формирование его заднего фронта. Электрическая схема устройства показана на рис. 1 ( $L_{СВМГ}$ ,  $L_{н}$  — индуктивности спиральной катушки ВМГ и нагрузки). Принцип действия этого устройства заключается в следующем: по окончании работы СВМГ с помощью обострителя тока в лайнере формируется передний фронт импульса тока. Под действием тока лайнер ускоряется. Величина приобретенной скорости определяется массой лайнера, амплитудой импульса тока и его длительностью. При подлете лайнера к мишени срабатывает прерыватель тока, который обеспечивает длительность импульса тока и формирует его задний фронт. При относительно кратковременных импульсах тока в системе происходит однократное торможение лайнера на образце и нагружение его одной ударной волной. Увеличение длительности импульса тока и соответственно длительности воздействия магнитного поля на лайнер приводит к увеличению длительности разгона лайнера и его двукратному торможению на образцах. В результате в образцах реализуется режим с двумя последовательно движущимися волнами сжатия. Отражение первой волны от внутренней (свободной) поверхности мишени создает условия для взаимодействия двух встречных волн разрежения и развития откольного разрушения, вторая волна уплотняет поврежденный материал, что позволяет изучить особенности осесимметричного компактирования поврежденного материала. Таким образом, задавая определенные моменты срабатывания обострителя и прерывателя тока, можно формировать в лайнере квазитрапецеидальный импульс тока необходимой длительности.

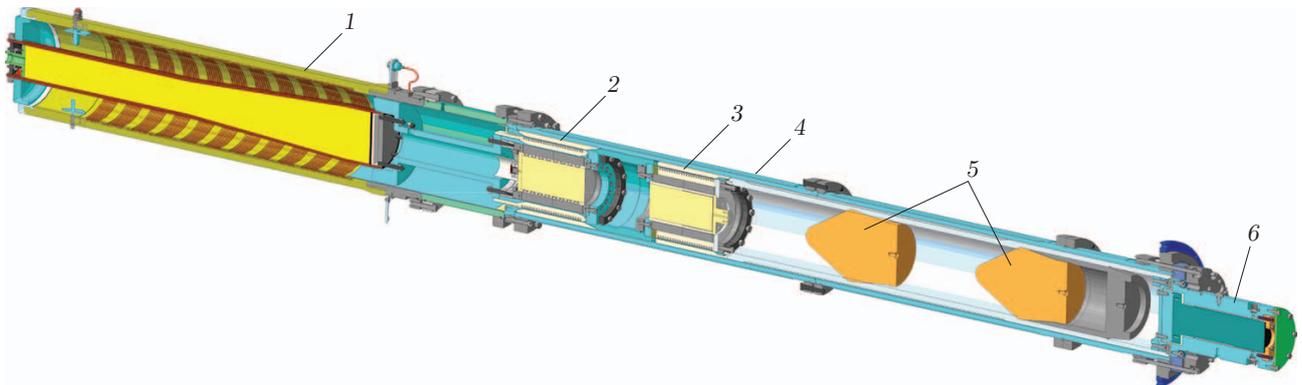


Рис. 2. Импульсный источник тока:

1 — СВМГ, 2 — ВОТ, 3 — ВПТ, 4 — коаксиальная передающая линия, 5 — конусообразные отражатели, обеспечивающие защиту лайнерной нагрузки от продуктов взрыва ВОТ и ВПТ, 6 — лайнерная нагрузка

**Устройство импульсного источника тока.** Для формирования импульса тока в нагрузке предпочтительнее использовать взрывные размыкатели тока, принцип работы которых основан на разрыве проводника диэлектрическими кумулятивными струями. Конструкция ВРТ, основанного на использовании кумулятивных струй, позволяет располагать заряд ВВ с системой его инициирования вне электрического контура размыкателя и осуществлять с помощью заряда ВВ размыкателя дополнительное сжатие магнитного потока в контуре ВМГ, что является преимуществом по сравнению с ВРТ, основанным на разрушении фольги, метаемой на ребристую преграду. Размыкатель тока состоит из алюминиевого проводника толщиной 0,8 мм, диаметром 200 мм и длиной 200 мм и полиэтиленовых струеформирователя и струегасителя. Для осуществления разрушения проводника в струеформирователе выполнены кумулятивные выемки, при схлопывании которых под действием ударной волны образуются кумулятивные струи, разрушающие проводник. Для предотвращения возникновения проводящих каналов в направлении распространения кумулятивных струй до обратного токопровода эти струи гасятся в достаточно толстом цилиндрическом слое полиэтилена (струегасителе).

На рис. 2 показана схема импульсного источника тока. Начальный магнитный поток в СВМГ создавался током разряда конденсаторной батареи на спиральную катушку.

Схема импульсного источника тока приведена на рис. 3 (С — конденсаторная батарея,  $L_{\text{СВМГ}}$ ,  $L_{\text{ПЛ}}$ ,  $L_{\text{Н}}$  — индуктивности спиральной катушки ВМГ, передающей линии и нагрузки,  $R_{\text{ВОТ}}$ ,  $R_{\text{ВПТ}}$  — сопротивления ВОТ и ВПТ, Р — разрядник).

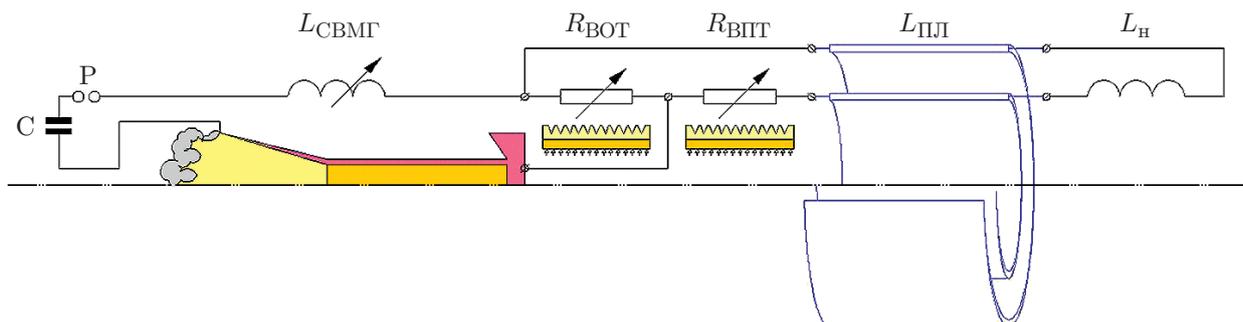


Рис. 3. Схема импульсного источника тока



Рис. 4. Импульсный источник тока с лайнерной нагрузкой

На рис. 4 показан импульсный источник тока с лайнерной нагрузкой, установленный на испытательном полигоне. Защита лайнерной нагрузки от осколочного и ударного воздействий, имеющих место при работе импульсного источника тока, обеспечивалась за счет удаления лайнерной нагрузки на 2 м от источника с помощью передающей линии, размещения лайнерной нагрузки за бронеплитой и установки во внутренней полости передающей линии конусообразных отражателей. Запас электромагнитной энергии в импульсном источнике тока позволяет в каждом эксперименте устанавливать в нагрузку несколько исследуемых образцов различного диаметра, что обеспечивает получение большего объема экспериментальных данных.

**Результаты испытаний импульсного источника тока.** Для исследования механизмов деформирования и разрушения материалов при ударном нагружении образцов в цилиндрической, сходящейся к оси геометрии совместно с Лос-аламосской национальной лабораторией (США) была проведена серия из 10 экспериментов, названная “R-Damage 0-9” [6–8]. Амплитуда импульса тока в экспериментах регулировалась путем изменения тока начальной запитки СВМГ от конденсаторной батареи. Длительность импульса тока зависела от момента подрыва прерывателя тока. В экспериментах “R-Damage 0-2” ВПТ работал с задержкой по времени, обеспечивающей длительность импульса тока в лайнерной нагрузке  $\approx 10$  мкс при времени спада тока  $\approx 2$  мкс. Увеличение времени задержки срабатывания ВПТ в электрической схеме формирователя импульса тока позволяет увеличить длительность импульса тока и соответственно длительность воздействия давления магнитного поля на лайнер. Такая схема была использована в опытах “R-Damage 3-9” при изучении особенностей компактирования поврежденного материала при осесимметричном сжатии.

К моменту срабатывания ВПТ значения конечной индуктивности контура СВМГ и контура нагрузки составляли по 22 нГн. В лайнерной нагрузке были получены импульсы тока с амплитудой  $5 \div 8$  МА и длительностью  $10 \div 25$  мкс. Характерные импульсы тока в лайнерной нагрузке, полученные в различных экспериментах серии “R-Damage”, показаны на рис. 5.

Во всех экспериментах была обеспечена сохранность лайнерных узлов при взрывном и ударном воздействии импульсного источника тока. Результаты экспериментов позволяют верифицировать численные модели откольного разрушения и компактирования поврежденной среды.

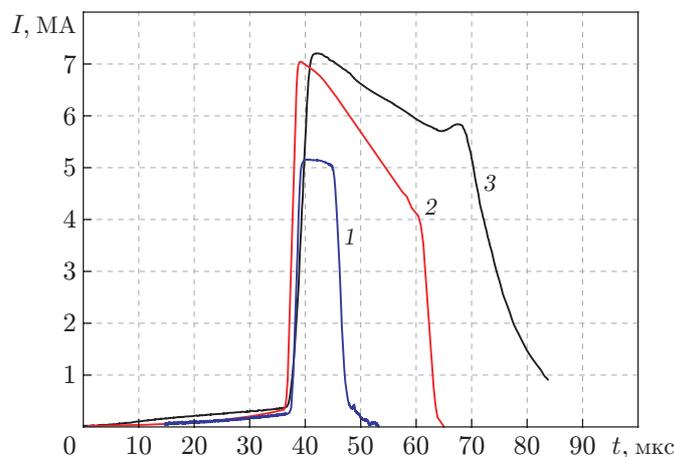


Рис. 5. Характерные импульсы тока в лайнерной нагрузке:  
1 — “R-Damage 0-2”, 2 — “R-Damage 3-7”, 3 — “R-Damage 8,9”

**Выводы.** На основе спирального взрывомагнитного генератора разработан взрывной источник тока, обеспечивающий создание в лайнерной нагрузке импульсов тока с контролируемой амплитудой и длительностью. В лайнерной нагрузке получены импульсы тока трапецеидальной формы с амплитудой до  $\approx 10$  МА. Результаты серии экспериментов “R-Damage”, в которых исследовались процессы откольного разрушения и компактирования материалов, показали перспективность применения представленных устройств для реализации необходимых режимов нагружения исследуемых образцов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Zhernokletov M. V. Material properties under intensive dynamic loading / M. V. Zhernokletov, V. L. Glushak. Berlin: Springer Verlag, 2006.
2. Иванов А. Г., Огородников В. А., Тюнькин Е. С. Поведение оболочек под действием импульсной нагрузки. Малые возмущения // ПМТФ. 1992. № 6. С. 112–115.
3. Чернышев В. К. Сверхмощные взрывомагнитные источники энергии для термоядерных и физических исследований // Тр. 7-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам “Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применения”, Саров, 5–10 авг. 1996 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 1997. С. 41–58.
4. Дудай П. В., Зименков А. А., Иванов В. А. и др. Исследование влияния параметров взрывного обострителя тока на время коммутации // Тр. Междунар. конф. “13-е Харитоновские научные чтения”, Саров, 14–18 марта 2011 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2011. С. 755–760.
5. Чернышев В. К., Андреевских Л. А., Волков Г. И. и др. Формирование диэлектрических кумулятивных струй для мегаамперных размыкателей тока // Тр. Междунар. конф. “3-и Харитоновские научные чтения: Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны”, Саров, 26 февр. — 2 марта 2001 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2002. С. 269–273.
6. Дудай П. В., Ивановский А. В., Reinovsky R. E. и др. Экспериментальный стенд на основе спирального ВМГ для исследований механизма откола в цилиндрической геометрии // Тр. Междунар. конф. “8-е Харитоновские научные чтения по проблемам физики высоких плот-

ностей энергии”, Саров, 21–24 марта 2006 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2006. С. 503–509.

7. **Васюков В. А., Глыбин А. М., Дудай П. В. и др.** Исследование реологических свойств алюминия с использованием взрывомагнитных генераторов // Докл. АН. 2013. Т. 448, № 3. С. 285–288.
8. **Kaul A. M., Ivanovsky A. V., Atchison W. L., et al.** Damage growth and recollection in aluminum under axisymmetric convergence using a helical flux compression generator // J. Appl. Phys. 2014. V. 115. 023516.

*Поступила в редакцию 16/X 2014 г.*

---