

Глава 27. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕГИСТРАЦИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СОУДАРЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРЕГРАД С ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ СГУСТКАМИ

¹Марукович Е.И., ²Ушеренко Ю.С., ³Ушеренко С.М., ⁴Галыго А.В., Волюнец А.С.,
⁵Овчинников В.И.

¹Институт технологии металлов НАН Беларуси,
г. Могилев, Беларусь, E-mail: info@itm.by

²Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития техники, технологии и экономики БНТУ,
г. Минск, Беларусь, E-mail: osher yu@mail.ru

³БНТУ, г. Минск, Беларусь, E-mail: usherenko@gmail.com

⁴Республиканское унитарное предприятие Белорусский государственный институт метрологии (БелГИМ),

г. Минск, Беларусь, E-mail: galygo@belgim.by, volynets@belgim.by

⁵ОХП «Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством» Института порошковой металлургии,
г. Минск, Беларусь, E-mail: ovchinnicovV@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрены особенности генерации излучения при применении для динамического легирования твердого тела технологии сверхглубокого проникания (СГП). При прошивке и легировании металлов и сплавов в режиме СГП порошковые частицы проникают на глубины в десятки и сотни миллиметров. При движении в металлической преграде сгустка микрочастиц (порошки) генерируется дополнительная энергия. При этом легирование локализуется и происходит за счет заноса порошковых микрочастиц. Энергия дополнительно генерируемого электрического поля в десятки и сотни раз превышает энергию сгустка, используемую для его разгона. Излучение было зарегистрировано при сверхглубоком проникании.

Keywords: super-deep penetration, composites, bunches of microparticles, electric field pulses

Введение

Основной технической проблемой в производстве композиционных волоконных материалов является значительная энергоемкость и низкая производительность процесса прошивки матричного материала волокнами.

Не менее важной задачей является регистрация процесса прошивки сгустками пыли защитных оболочек космических кораблей. Важность решения такой задачи связано с тем, что использование в качестве критерия поражения защитных оболочек в околоземном пространстве процесса разгерметизации наталкивается на ряд специфических ограничений. Эти специфические эффекты делают такой подход к регистрации поражения космических аппаратов (КА) недостаточно эффективным.

Ограничение связано с тем, что сгустки (облака) космической пыли действуют на преграды относительно длительные периоды времени. При этом в преграде создаются пульсирующие поля давления, а материал преграды приобретает дополнительную упругость. Материал защитной оболочки космического аппарата приобретает свойства подобные свойствам плотной резины. Резиновую оболочку можно прошить шилом. Однако после извлечения шила из резины отверстие захлопывается. Процесс разгерметизации прекращается.

Однако, при наличии методики регистрации излучения, которое возникает при прошивке металлической преграды, становится возможным не только регистрация факта прошивки, но и определение времени этого процесса. На определенном этапе исследований наличие такой методики позволит проводить дополнительную оценку генерируемой в условиях СГП электромагнитной энергии.

Создание новой технологии легирования металлов и сплавов в твердом состоянии оказывается возможным при использовании комбинации динамических эффектов и при комбинации известных технологических операций. В условиях нашей

планеты реализовать аномалии СГП возможно при соударениях сгустков дискретных порошковых частиц с металлическими преградами. При этих условиях стабильно наблюдается скачкообразное проникновение пылевых микрочастиц в металлы и сплавы на глубины до 100 – 10 000 калибров ударника.

Результаты СГП отличаются от обычного (классического) внедрения при ударе. Массоперенос в твердом теле ударными волнами и электромагнитное излучение из зон прошивки могут влиять на параметры СГП в режиме реального времени.

Скорости отвода энергии от ударников могут быть выше или ниже, чем скорости движения частиц по траектории внедрения внутри твердого тела. Значительная часть энергии затрачивается на преодоление сопротивления внедрению частицы. Соотношение скоростей подвода и отвода энергии в закрытой системе предопределяет достигаемую плотность энергии в объеме канальной зоны [1].

Наличие градиента плотности в матричном материале позволяет управлять процессом динамического массопереноса в автомодельном режиме. Перепады плотности по объему материала преграды позволяют кумулировать энергию, например за счет отражения ударных волн.

За счет фокусировки ударных волн в преграде формируются зоны высокого и сверхвысокого давления. В режиме реального времени процесса сверхглубокого проникания происходит размывание вводимого вещества по стенкам формируемого ударником канального элемента. При захлопывании каналов со скоростями- 1000 м/с вводимый и матричный материалы взаимодействуют между собой, т.е. реализуется динамический массоперенос. Для того, чтобы операция прошивки металлических массивных материалов сгустками пылевых частиц в режиме сверхглубокого проникания оказалась основой для производства волоконных композиционных материалов требуется выполнение двух основных условий: первое – подвод дополнительной энергии к сгустку дискретных порошковых частиц при прошивке матричных преград, т.е. энергосберегающий эффект; второе - возможность введения в армирующие волокна широкой гаммы легирующих материалов, в том числе редких, редкоземельных и радиоактивных изотопов [2]. Движение частиц происходит при интенсивном трении частиц, что приводит к потере массы ударника при движении (более 99%). Таким образом, часть материала сгустка частиц преобразуется в армирующее волокно [1,3].

Для Республики Беларусь генерация дополнительной энергии в результате процесса сверхглубокого проникания, а также доступность и дешевизна вводимых в арматуру легирующих материалов является основными условиями успеха промышленного производства.

Работа выполнена в рамках задания «Разработать экспериментальную установку моделирования и регистрации высокочастотного импульсного электромагнитного излучения, имитирующую условия взаимодействия высокоскоростных потоков микрочастиц космической пыли с космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли в условиях околоземного пространства» программы «Мониторинг-СГ».

Целью данной работы является разработка основ регистрации излучения на разных стадиях инициирования, взрыва заряда и разгона пылевых частиц, а также движения сгустка частиц в преграде в режиме сверхглубокого проникания.

1. Методика регистрации импульсного излучения

Установка моделирования и регистрации высокочастотного электромагнитного излучения (далее – установка ЭМИ) предназначена для моделирования высокочастотного импульсного электромагнитного излучения, имитирующего условия взаимодействия высокоскоростных потоков микрочастиц космической пыли с космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли в условиях околоземного пространства.

1.1. Экспериментальные исследования

Перечень операций, проводимых при экспериментальных исследованиях, приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень операций, проводимых при экспериментальных исследованиях

Наименование операции	Номер пункта ПМА
Установление технических характеристик, определяемых в процессе аттестации	1.2
Требования к окружающим условиям проведения исследований и эталонам	1.3
Установление режима работы установки, при котором определяются значения технических характеристик	1.4
Требования техники безопасности	1.5
Подготовка к исследованиям	1.6
Внешний осмотр	1.7
Определение технических характеристик	1.8
Оформление результатов аттестации	1.9

1.2 .Установление технических характеристик, определяемых в процессе аттестации

В процессе аттестации определяют технические характеристики, приведенные в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики, определяемые в процессе аттестации

Наименование технических характеристик	Номер пункта методики аттестации
Определение напряженности электрического поля, создаваемого установкой ЭМИ в момент взаимодействия частиц	1.8.1

1.3 .Требования к окружающим условиям проведения исследований и эталонам

Экспериментальные исследования установки ЭМИ должны проводиться при установленных в документации условиях для исключения дополнительной погрешности от влияния внешних факторов:

температура окружающей среды от 5 до 40 °С;
 относительная влажность от 5 до 80 %.

Перечень эталонов, необходимых для проведения аттестации установки ЭМИ, приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Перечень эталонов, необходимых для проведения аттестации установки ЭМИ

Наименование эталона	Основные метрологические характеристики
Осциллограф LeCroy WaveRunner 610ZI	Полоса пропускания – 1 ГГц; время нарастания – 375 пс; входное сопротивление – 50 Ом, 1 МОм; погрешность измерения постоянного напряжения – ±(1,5% от полной шкалы + 1 мВ)
Антенна измерительная CBL 6112B	Диапазон рабочих частот от 30 до 2000 МГц; погрешность коэффициентов калибровки – ± 2,0 дБ
Дальномер лазерный LEICA DISTO D510	Диапазон измеряемых расстояний от 0,01 до 200 м; погрешность измерения расстояние ± 1,0 мм

Продолжение таблицы 3

Термогигрометр ИВА-6Б	Диапазон измеряемых значений температуры от 0 °С до +60 °С; пределы допускаемой погрешности измерения температуры $\delta_T = \pm 0,5$ °С; диапазон измеряемых значений относительной влажности от 0 % до 98 %; пределы допускаемой погрешности измерения относительной влажности $\delta_{вл} = \pm 2$ %.
Примечания: 1 Вместо указанных СИ допускается применять аналогичные СИ, обеспечивающие измерения соответствующих параметров с требуемой точностью. 2 СИ должны иметь действующие клейма и свидетельства о прохождении поверки. 3 Условия эксплуатации СИ должны соответствовать условиям экспериментальных исследований.	

1.4 .Установление режима работы установки, при котором определяются значения технических характеристик

Технические характеристики установки ЭМИ определяют при следующих условиях:

- масса заряда взрывчатого вещества – 0,2 кг;
- материал частиц – аммонит;
- расстояние пролета частиц от места выстрела до места взаимодействия – 0,15 м;
- материалы преграды, с которым взаимодействуют частицы – сталь и алюминий.

1.5 .Требования техники безопасности

Взрывные работы должны проводиться только на специально оборудованном полигоне. Не допускается нахождения людей на полигоне вне защищенных мест (бункеров) в момент произведения взрыва.

1.6 .Подготовка к исследованиям

Подготовку к исследованиям проводят в следующей последовательности:

- проверяют выполнение требований условий аттестации;
- заземляют измерительные приборы;
- в соответствии с руководством по эксплуатации проводят подготовку к работе эталонов, применяемых при аттестации.

1.7 .Внешний осмотр

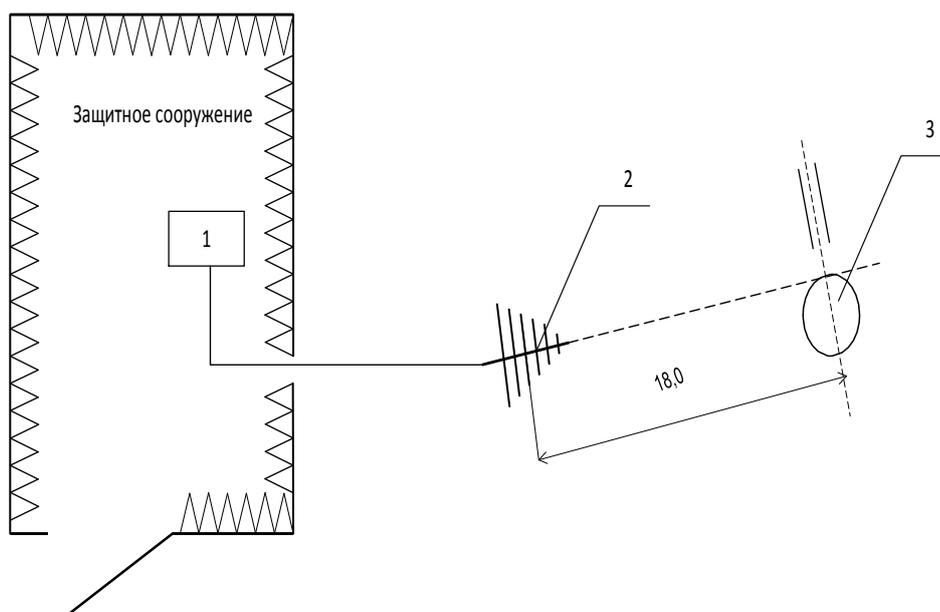
При проведении внешнего осмотра должно быть установлено выполнение следующих требований:

- установка не должна иметь механических повреждений, влияющих на её нормальную работу;
- установка должны быть надёжно закреплена для проведения направленного взрыва в соответствии с её назначением.

1.8 .Определение технических характеристик

1.8.1.Определение напряженности электрического поля, создаваемого установкой ЭМИ в момент взаимодействия частиц

Измерения напряженности электрического поля, создаваемого установкой ЭМИ в момент взаимодействия частиц, производят на специально оборудованном полигоне. Приборы соединяют по схеме, приведенной на рисунке 1.



1 – осциллограф LeCroy WaveRunner 610ZI;
 2 – антенна измерительная CBL 6112B;
 3 – установка ЭМИ.

Рисунок 1 – Схема соединения приборов при определении напряженности электрического поля, создаваемого установкой ЭМИ в момент взаимодействия частиц

Измерительную антенну размещают на полигоне на расстоянии от 10 до 20 м от установки ЭМИ, обеспечивающем измерения в дальней зоне измерительной антенны и безопасное расстояние, исключающее повреждение антенны в результате взрыва. Не допускается наличие посторонних предметов в зоне между измерительной антенной и установкой ЭМИ, а также в радиусе 5 м от них. Для исключения влияния защитного сооружения на результаты измерений расстояние от антенны до защитного сооружения должно быть не менее 10 м. Высота установки антенны над поверхностью земли – 1,2 м. Поляризацию антенны устанавливают вертикальной, так как на основании экспериментальных исследований установлено преобладание вертикальной составляющей электрического поля (приложение Б). Подключают измерительную антенну к осциллографу посредством коаксиального кабеля длиной около 15 м.

Подготавливают установку к выстрелу в соответствии с параметрами, изложенными в п. 1.4.

Устанавливают следующие параметры осциллографа:

- входное сопротивление – 50 Ом;
- коэффициент отклонения – 100 мВ/дел;
- коэффициент развертки – 1 мс/дел;
- ждущий режим, единичный запуск.

Параметры осциллографа выбраны как оптимальные по результатам предварительных экспериментальных исследований (приложение Б).

Производят взрыв (выброс сгустка микрочастиц), после чего срабатывает запуск развертки осциллографа и отображается осциллограмма. Производят анализ полученной осциллограммы. Примерный вид осциллограммы приведен на рисунке 2.

При проведении экспериментальных исследований установлено, что в момент взрыва детонатора осциллограф регистрирует первый импульс, излучаемый системой. С точки зрения исследований интерес представляет импульс электромагнитной энергии, возникающий при соударении частиц с материалом сердечника установки, который следует через несколько миллисекунд после взрыва и по амплитуде превосходит первый. Экспериментально доказано, что второй импульс возникает именно от соударения частиц с материалом сердечника установки ЭМИ (приложение Б).

Регулируют параметры осциллографа таким образом, чтобы получить оптимальное для исследований изображение второго импульса на экране осциллографа и регистрируют его параметры (напряжения $U_{ИЗМ}$, В, и период следования $T_{ИЗМ}$, с).

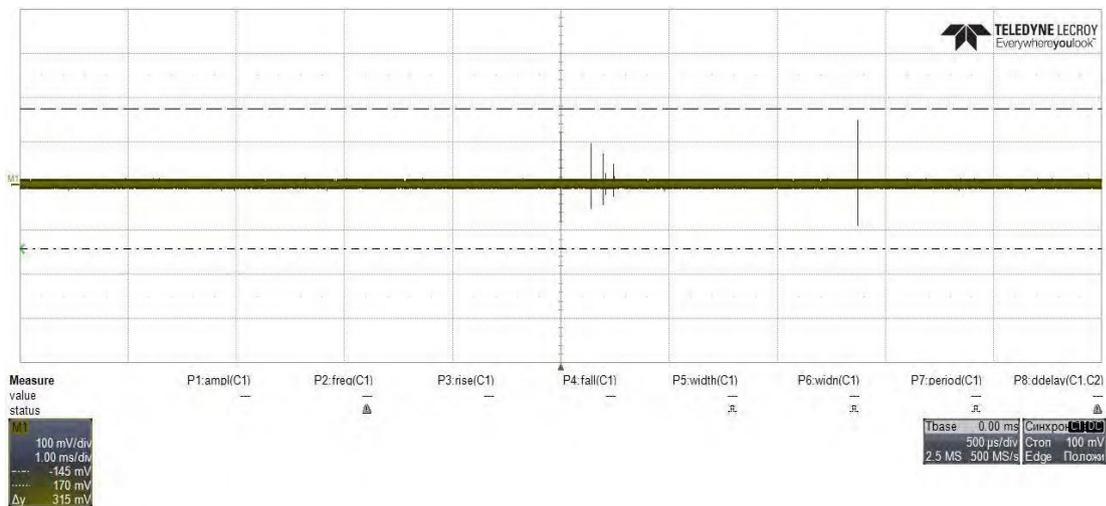


Рисунок 2 – Осциллограмма сигнала после проведения взрыва

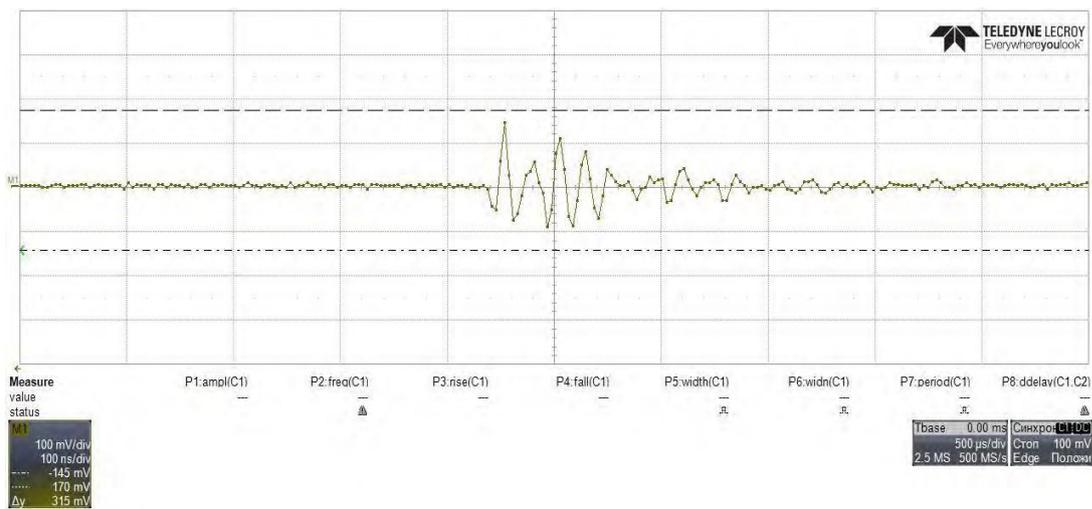


Рисунок 3 – Увеличенная осциллограмма сигнала от взаимодействия частиц с материалом сердечника

Определяют ориентировочную частоту сигнала, излучаемого при взаимодействии частиц с материалом сердечника:

$$f_{ИЗМ} = \frac{1}{T_{ИЗМ}}, \quad (1)$$

где $f_{ИЗМ}$ – частота сигнала, Гц;

$T_{ИЗМ}$ – период сигнала, с.

Производят расчет напряженности электрического поля в месте расположения антенны:

$$E_{ИЗМ R1} = 20 \lg \left(\frac{U_{ИЗМ}}{10^{-6}} \right) + K_{АНТ} + A_{КАБ}, \quad (2)$$

$E_{ИЗМ R1}$ – напряженность электрического поля в месте расположения антенны, дБ (мкВ/м).

$K_{АНТ}$ – коэффициент калибровки измерительной антенны на частоте $f_{ИЗМ}$, дБ;

$A_{КАБ}$ – затухание коаксиального кабеля, соединяющего антенну с осциллографом, дБ.

Исходя из условий распространения электромагнитного поля в свободном пространстве, производят расчет напряженности электрического поля на расстоянии $R_2 = 3$ м от установки ЭМИ:

$$E_{ИЗМ R2} = E_{ИЗМ R1} + 20 \lg \left(\frac{R_1}{R_2} \right), \quad (3)$$

где $E_{ИЗМ R2}$ – напряженность электрического поля на расстоянии R_2 от установки ЭМИ, дБ (мкВ/м);

R_1 – расстояние от установки ЭМИ до антенны при проведении эксперимента;

$R_2 = 3$ м.

Производят расчет напряженности электрического поля на расстоянии R_1 от установки ЭМИ, В/м:

$$E_{ИЗМ} = 10^{\frac{E_{ИЗМ R2}}{20}} \cdot 10^{-6}, \quad (4)$$

где $E_{ИЗМ}$ – напряженность электрического поля на расстоянии R_2 от установки ЭМИ, В/м;

Измерения повторяют для различных типов материалов сердечника (металлического образца), с которым производится взаимодействие частиц.

1.9. Оформление результатов аттестации (измерения)

Результаты аттестации оформляются протоколом по форме, приведенной в Приложении А.

Наименование, тип	Номер	Дата очередной калибровки (поверки)

А.8 Результаты измерений:

Определение напряженности электрического поля, создаваемого установкой ЭМИ в момент взаимодействия частиц

Наименование характеристики	Значение
Материал частиц, которые взаимодействуют с сердечником	
Материал сердечника, с которым взаимодействуют частицы	
Расстояние от измерительной антенны до установки R_1 , м	
Расстояние, для которого производится расчет характеристик электромагнитного поля R_2 , м	
Высота расположения антенны над поверхностью земли, м	
Расстояние пролета частиц от места выстрела до места воздействия с материалом сердечника, м	
Затухание коаксиального кабеля, дБ	
Измеренное значение напряжения второго импульса $U_{ИЗМ}$, мВ	
Период следования сигнала $T_{ИЗМ}$, нс	
Частота сигнала $f_{ИЗМ}$, МГц	

Наименование характеристики	Значение
Коэффициент калибровки измерительной антенны на частоте измерений, дБ	
Напряженность электрического поля в месте расположения антенны $E_{ИЗМ R_1}$, дБ(мкВ/м)	
Напряженность электрического поля на расстоянии R_2 от установки ЭМИ $E_{ИЗМ R_2}$, дБ(мкВ/м)	
Напряженность электрического поля на расстоянии R_2 от установки ЭМИ $E_{ИЗМ}$, В/м	

Аттестацию провели:

Приложение Б

Результаты предварительных экспериментальных исследований

Было выполнено ряд экспериментальных исследований для определения характера создаваемого электромагнитного поля при взаимодействии частиц.

При проведении исследований были использованы приборы и схемы подключения, описанные в настоящей методике, с различными отступлениями, описанными ниже.

Эксперимент №1

Наименование характеристики	Значение
Масса взрывчатого вещества, кг	0,1
Материал частиц, которые взаимодействуют с сердечником	SiC
Материал сердечника, с которым взаимодействуют частицы	сталь
Расстояние от измерительной антенны до установки R_1 , м	18,4
Высота расположения антенны, м	1,2
Поляризация антенны	горизонтальная
Расстояние пролета частиц от места выстрела до места воздействия, м	0,15

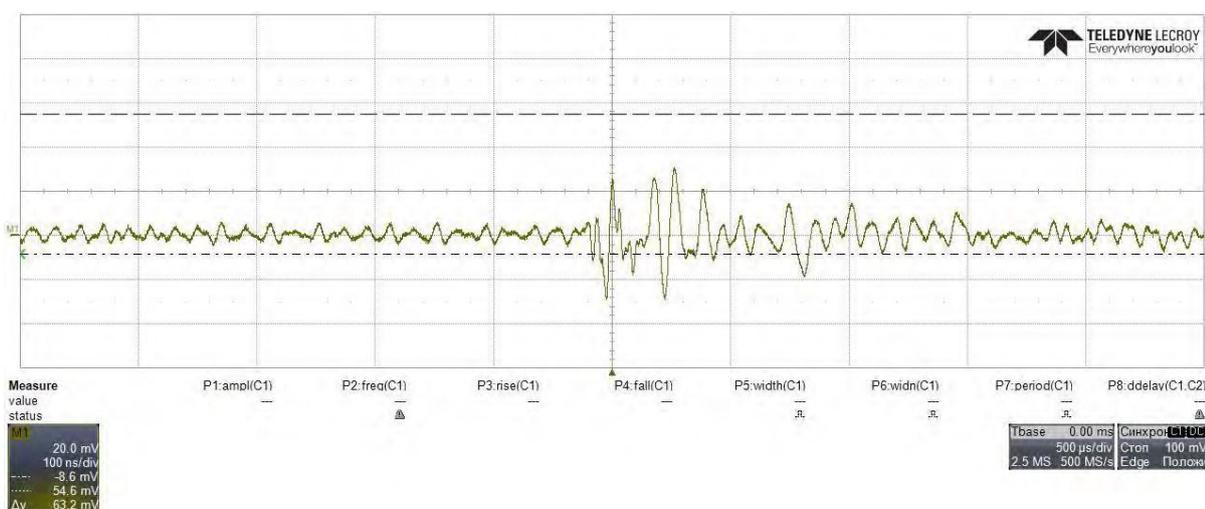


Рисунок 4 – Из результатов эксперимента 1 видно, что в момент выстрела возникает небольшой по амплитуде электромагнитный импульс.

Эксперимент №2

Наименование характеристики	Значение
Масса взрывчатого вещества, г	0 (взрыв детонатора)
Материал частиц, которые взаимодействуют с сердечником	SiC
Материал сердечника, с которым взаимодействуют частицы	сталь
Расстояние от измерительной антенны до установки R_1 , м	18,4
Высота расположения антенны, м	1,2
Поляризация антенны	вертикальная
Расстояние пролета частиц от места выстрела до места воздействия, м	0,15

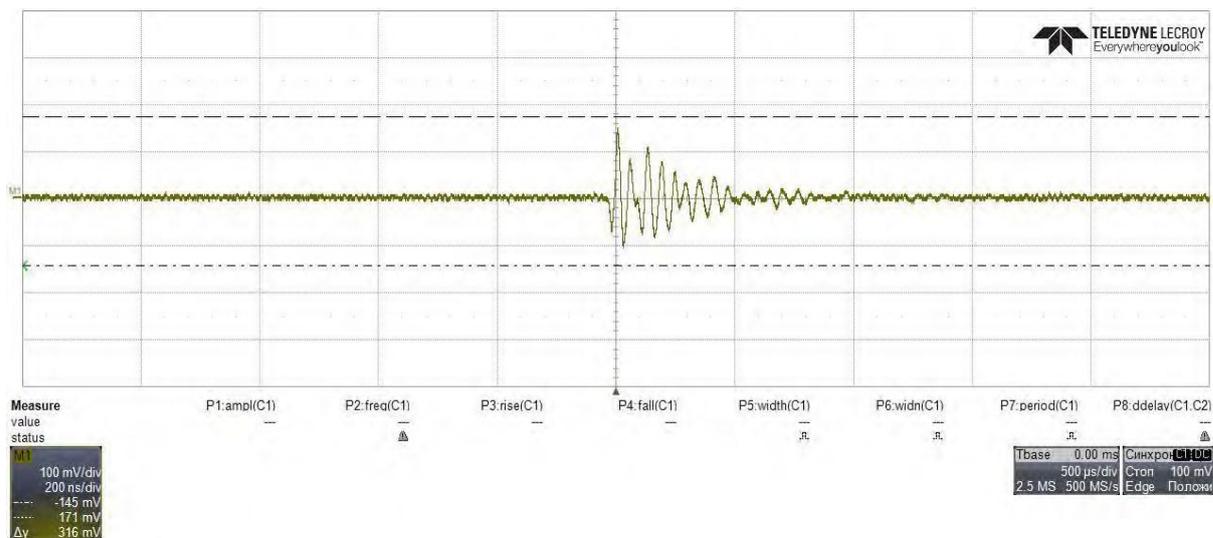


Рисунок 5 – Из результатов эксперимента 2 видно, что электромагнитный импульс создается взрывом электродетонатора.

Эксперимент №3

Наименование характеристики	Значение
Масса взрывчатого вещества, кг	0,2
Материал частиц, которые взаимодействуют с сердечником	SiC
Материал сердечника, с которым взаимодействуют частицы	сталь
Расстояние от измерительной антенны до установки R_1 , м	18,4
Высота расположения антенны, м	1,2
Поляризация антенны	вертикальная
Расстояние пролета частиц от места выстрела до места воздействия, м	0,15

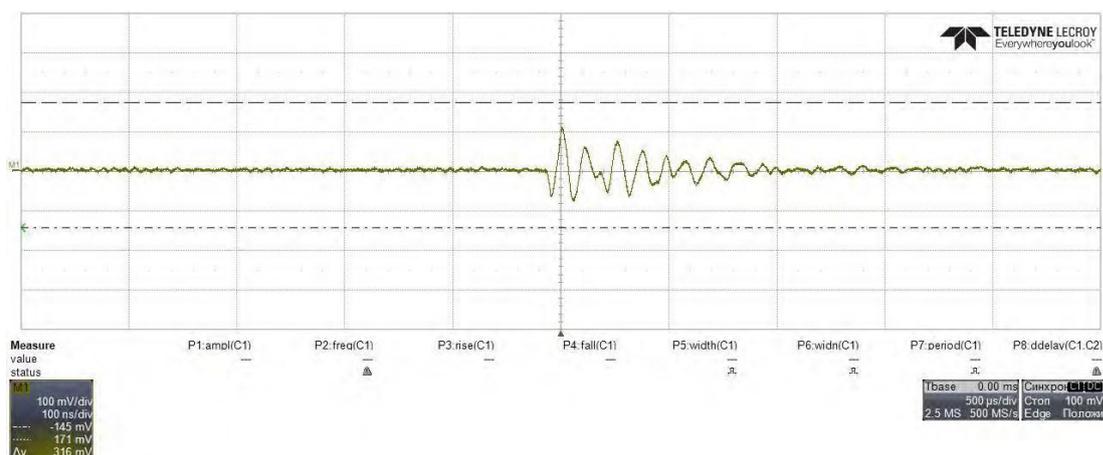


Рисунок 6 – Из результатов эксперимента №3 видно, что электромагнитный импульс, зарегистрированный при вертикальной поляризации антенны, значительно превосходит по амплитуде импульс, зарегистрированный при горизонтальной поляризации

Эксперимент №4

Наименование характеристики	Значение
Масса взрывчатого вещества, кг	0,2
Материал частиц, которые взаимодействуют с сердечником	аммонит
Материал сердечника, с которым взаимодействуют частицы	сталь
Расстояние от измерительной антенны до установки R_1 , м	18,4
Высота расположения антенны, м	1,2
Поляризация антенны	вертикальная
Расстояние пролета частиц от места выстрела до места воздействия, м	0,15

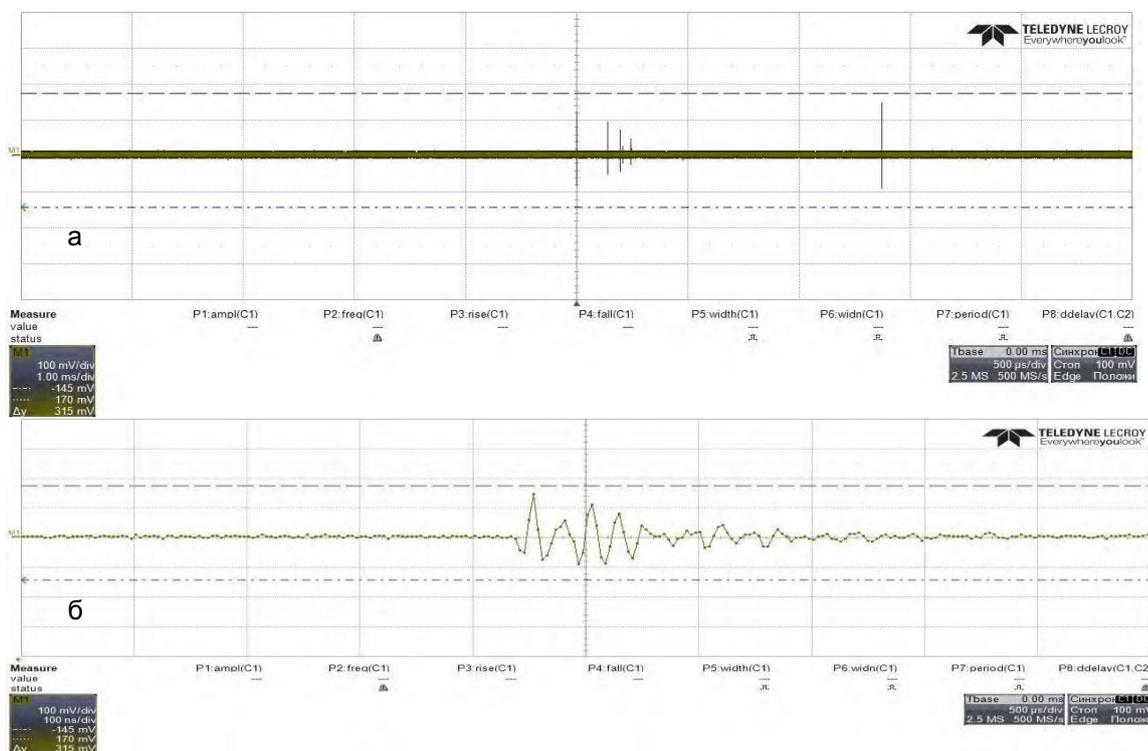


Рисунок 7 – Через несколько миллисекунд после взрыва (выстрела) возникает второй электромагнитный импульс – б, предположительно создаваемый в результате взаимодействия частиц с материалом сердечника, который по амплитуде значительно превосходит импульс – а, излучаемый при подрыве заряда взрывчатого вещества

Эксперимент №5

Наименование характеристики	Значение
Масса взрывчатого вещества, кг	0,2
Материал частиц, которые взаимодействуют с сердечником	SiC
Материал сердечника, с которым взаимодействуют частицы	алюминий
Расстояние от измерительной антенны до установки R_1 , м	18,4
Высота расположения антенны, м	1,2
Поляризация антенны	вертикальная
Расстояние пролета частиц от места выстрела до места воздействия, м	0,15

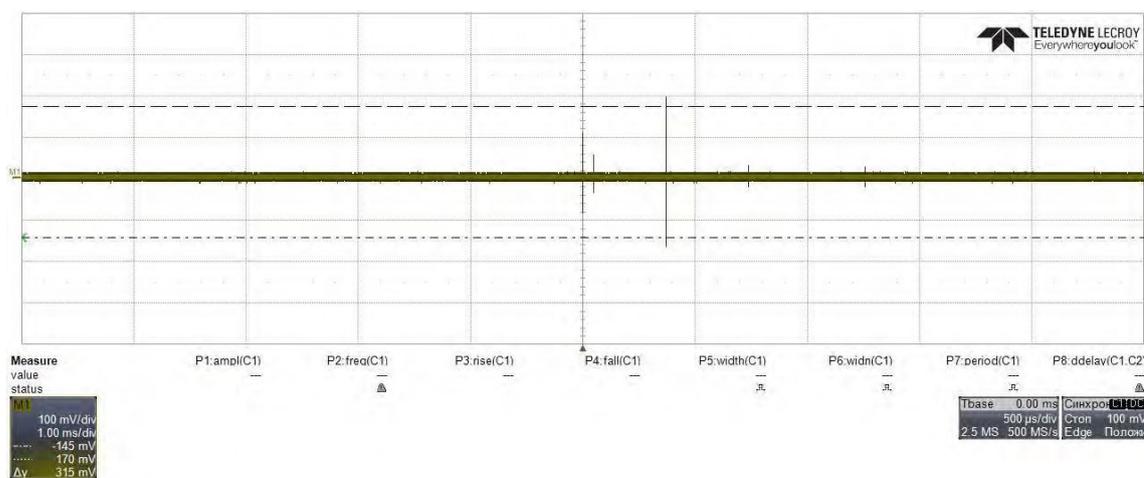


Рисунок 8 – Электромагнитный импульс, создаваемый в результате взаимодействия микрочастиц с алюминием, который превышает по амплитуде импульс, создаваемый при взаимодействии частиц со сталью

Эксперимент №6

Наименование характеристики	Значение
Масса взрывчатого вещества, к г	0,2
Материал частиц, которые взаимодействуют с сердечником	нет
Материал сердечника, с которым взаимодействуют частицы	нет
Расстояние от измерительной антенны до установки R_1 , м	18,4
Высота расположения антенны, м	1,2
Поляризация антенны	вертикальная
Расстояние пролета частиц от места выстрела до места воздействия, м	без взаимодействия

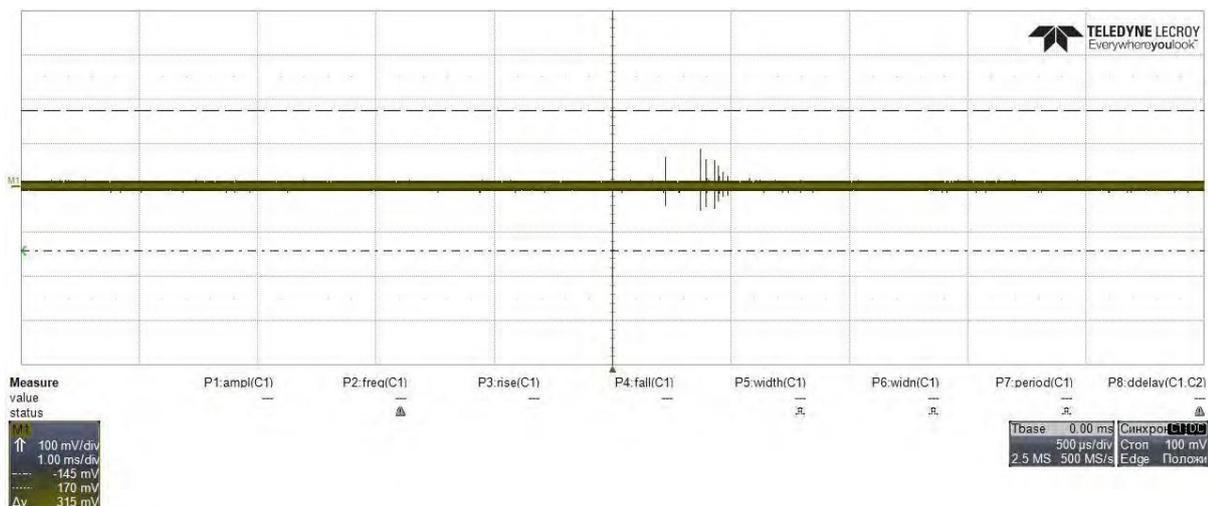


Рисунок 9 – После выстрела – взрыва заряда взрывчатого вещества – аммонит №6ЖВ, второй электромагнитный импульс без применения сгустка частиц, не был зарегистрирован

Эксперимент №7

Наименование характеристики	Значение
Масса взрывчатого вещества, г	0,2
Материал частиц, которые взаимодействуют с сердечником	SiC
Материал сердечника, с которым взаимодействуют частицы	нет
Расстояние от измерительной антенны до установки R_1 , м	18,4
Высота расположения антенны, м	1,2
Поляризация антенны	вертикальная
Расстояние пролета частиц от места выстрела до места воздействия, м	без взаимодействия

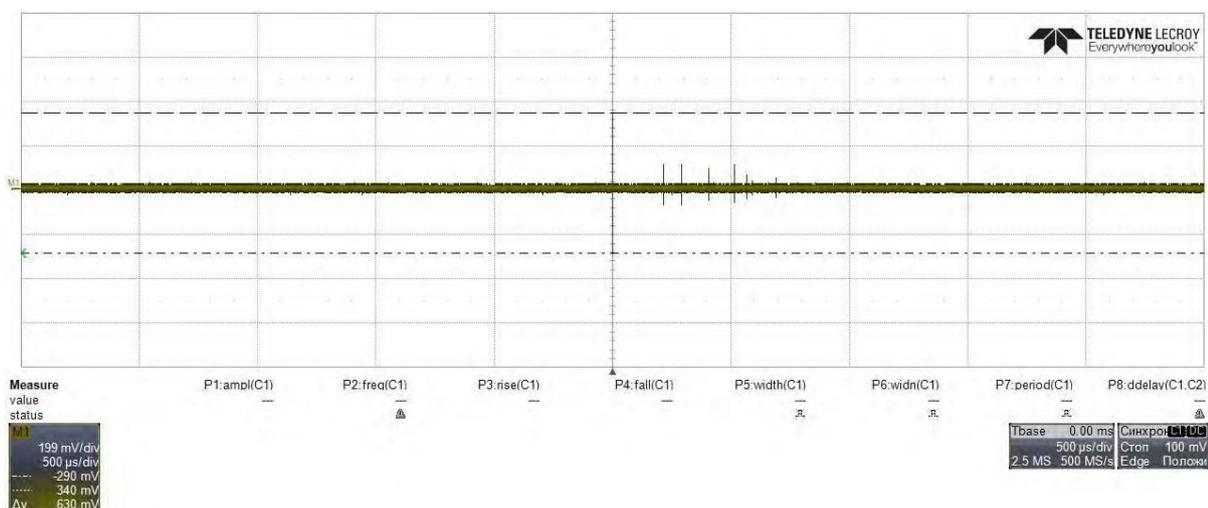


Рисунок 10 – После выстрела – взрыва взрывчатого вещества с распространением частиц аммонита, но без взаимодействия микрочастиц с материалом сердечника, второй электромагнитный импульс не зарегистрирован

Заключение

На основании цикла экспериментов, в рамках которых микрочастицы разгонялись, а дополнительная электромагнитная энергия выделялась за счет: взрывов электродетонаторов, выстрелов (взрывов заряда) взрывчатых веществ и соударений сгустков микрочастиц с металлическими преградами можно сделать следующие основные выводы:

1. Создана экспериментальная методика, позволяющая оценить особенности генерации электромагнитной энергии на взрывном ускорителе.

2. Наиболее значительный электромагнитный импульс (ЭИ), который больше электромагнитных импульсов при взрыве электродетонатора и заряда взрывчатого вещества, фиксируется в процессе сверхглубокого проникания сгустка микрочастиц в металлические преграды. Соответственно, наиболее значительная генерация электромагнитной энергии реализуется при прошивке частицами металлической преграды.

3. Электромагнитный импульс, создаваемый в результате взаимодействия микрочастиц с алюминием, превышает по амплитуде импульс, создаваемый при взаимодействии частиц со сталью. Соответственно, величина генерируемой электромагнитной энергии при прошивке частицами SiC металлического твердого тела при СГП зависит от металлической матрицы.

4. Электромагнитный импульс, зарегистрированный при вертикальной поляризации антенны, значительно превосходит по амплитуде импульс, зарегистрированный при горизонтальной поляризации.

Список литературы:

1. Марукович Е.И., Ушеренко Ю.С., Ушеренко С.М. Процесс прошивки металлов и сплавов сгустками порошковых частиц. Перспективные материалы и технологии. Монография. Глава 18. Под редакцией заслуженного деятеля науки Республики Беларусь, академика В.В. Клубовича. – Витебск. УО «ВГТУ», 2015. -С. 314- 331.

2. Usherenko S.M., Lyutina D.A. Electric field generated at energy conducting from metal target. Works of the international conference – «Shock waves in condensed matter». Kiev, Ukraine, 16-21 September, 2012. - p.p.404- 409.

3. Ушеренко С.М., Ушеренко Ю.С., Марукович Е.И. Энергия, генерируемая при проникании пылевых сгустков. Изобретатель. – 2012. -№10 (154). -С.44-48.