

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ПОЗИТРОННЫХ МИШЕНЕЙ

А.Г. Никифоров, Ю.С. Евдокимова

В электрон-позитронном ускорителе для получения позитронов важную роль играет мишень, которая может выдерживать предельную мощность порядка 10^{12} ГэВ/мм² за импульс, сохраняя при этом свои механические свойства. В работе рассмотрены требования к материалу мишени и ее конструкция. В программном комплексе GEANT4 проведено моделирование взаимодействия мишени с пучком электронов. Изучены свойства материалов, используемых в конструкции мишени. Установлено, что ковар и керамика различного состава удовлетворяют требованиям, предъявляемым к материалу мишени. Предложена технология получения соединения металл-керамика для позитронных мишеней

Ключевые слова: позитронная мишень, ковар, карбид бора электронно-лучевая пайка, динамические нагрузки.

Одной из существенных проблем, которые ограничивают получение интенсивных пучков позитронов является устойчивость позитронной мишени к термомеханическим нагрузкам, которые возникают в ней при падении мощного первичного электронного пучка. Предельная пиковая мощность, которую может выдержать твердая мишень, составляет величину $2 \cdot 10^{12}$ ГэВ/мм² за импульс. В проектах будущих источников позитронов пиковая мощность первичного электронного пучка превышает эту величину. Одним из возможных решений данной проблемы является использование мишени из сплава жидкого свинца. Разогретый до $\sim 300^\circ\text{C}$ сплав прокачивается через мишень с помощью специального насоса.

Мишень представляет собой канал прямоугольного сечения из ковара, с двумя отверстиями диаметром 8 мм. Первое – в месте падения первичного электронного пучка, второе – в месте выхода вторичного пучка из мишени. В эти отверстия впаяны окна из керамики карбида бора толщиной 5 мм [1]. Керамика способна выдерживать большие механические нагрузки, которые возникают при импульсном нагреве материала мишени. Вся система теплоизолирована и прогревается до температуры $\sim 300^\circ\text{C}$. Для того чтобы избежать окисления свинца, весь контур находится в вакууме.

На электрон-позитронных коллайдерах следующего поколения требуется на несколько порядков большая производительность позитронного источника. В этом случае средняя тепловая мощность, выделяющаяся

в мишени, приводит к необходимости использовать в качестве конверсионной мишени вращающееся колесо или поток жидкого металла.

Из-за того, что окно мишени является составляющей частью конверсионной системы и закреплена в коваровом держателе, технологические (образование сварного металл-керамического шва) особенности играют немаловажную роль в изучении материалovedческого состава конверсионной мишени.

В таблице 1 представлены основные технологические и физико-механические характеристики электрон-позитронной конверсионной системы

Таблица 1 – Технологические и физико-механические особенности конверсионной электрон-позитронной мишени

Параметр	Значение
Энергия испускания электронного пучка	270 МэВ – 1 ГэВ
Мощность за импульс	$2 \cdot 10^{12}$ ГэВ/мм ²
Температура системы	300 °С
Количество электронов в пучке	$10^6 - 10^{10}$

На рисунке 1 представлен чертеж конверсионной системы, где в потоке жидкого металла происходит электромагнитный ливень и рождаются электрон-позитронные пары.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ПОЗИТРОННЫХ МИШЕНЕЙ

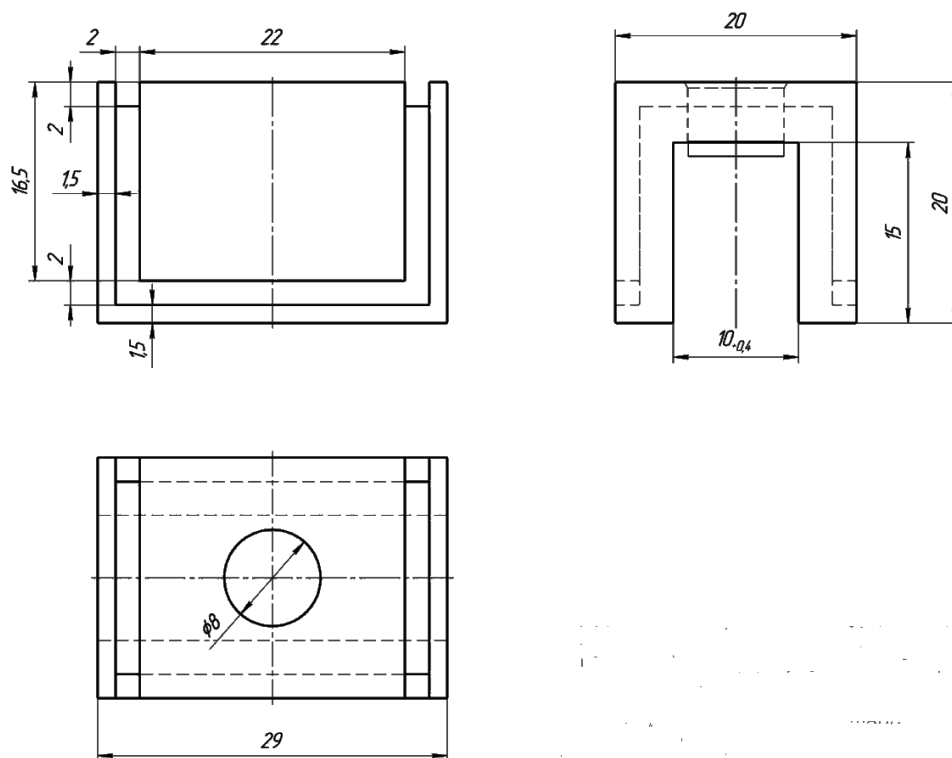


Рисунок 1 – Чертеж электрон-позитронной установки конверсионной мишени

Для изготовления окна мишени были предложены: оксид алюминия и карбид бора. Также были исследованы свойства вольфрама, который используется в составе конверсионных мишеней. В качестве держателя мишени выбран ковар – сплав, в состав которого входит железо, никель и кобальт (таблица 2). В России ковар маркируют 29НК.

Таблица 2 – Состав ковара в массовых долях, %

Компонент	Ni	Co	C	Si	Mn	Fe
Содержание, %	29	17	<0,01	0,2	0,3	53,4

Таблица 3 – Свойства ковара [2]

Свойство	Значение
Температура плавления	1450 °С
Коэффициент теплового расширения	$(4,5-5,2) \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ в интервале 20-400 °С
Плотность	8350 кг/м ³
Модуль упругости	$1,96 \cdot 10^{11}$ Па (Н/м ²)
Предел прочности при ударе	1200

В ходе изучения условий эксплуатации конверсионной системы было установлено,

что материал должен обладать высокой температурой плавления, около 2000 °С, пределом прочности 600 МПа, теплостойкостью при 300 °С, коэффициент теплового расширения (КТР) порядка $5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ в интервале 20-400 °С. Таблица 4 помогает сделать сравнительный анализ материалов мишени.

Таблица 4 – Характеристика материалов, применяемых для изготовления окна конверсионной мишени [3]

Свойство	Корундовая керамика	Карбид бора	Вольфрам
Температура плавления, °С	2050	2350	3422
Теплостойкость, °С	1100	1400-1500	2500
Коэффициент теплового расширения, 1/°С	$5,4 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$
Предел прочности при ударе, МПа	1200	2000	1000

Материал рабочей части мишени должен иметь достаточно высокую конверсионную способность, материал окон – высокий коэффициент пропускания электронов.

Таким образом, в процессе изучения свойств материалов, было установлено, что керамика удовлетворяет требованиям, предъявленным к окнам конверсионной мишени электрон-позитронного ускорителя.

В качестве метода исследования был использован программный комплекс GEANT4, представляющий собой пакет для моделирования прохождения излучения через вещество, который для получения более эффективного затрата машинного времени использует вычисленные коэффициенты.

Программа считывает заданные коды на языке программирования C++, далее моделирует некоторую реальную систему, создает визуализацию. Записывание кодов является самой важной задачей, так как при этом в GEANT4 заносится трехмерная модель системы, характеристики материалов, из которых она состоит. Пользователь должен обеспечить сохранение данных в удобном ему формате. В процессе работы GEANT4 рассчитывает траектории прохождения различных элементарных частиц в заданной системе [3].

Этапы моделирования в программном комплексе GEANT4:

1. моделирование мишени как твердотельного объекта с заданными параметрами;
2. определение оптимального числа электронов в первичном пучке, возможность изменения материала окна мишени;
3. задание энергии (МэВ) электронов, число пучков;
4. визуализация программы;
5. анализ выходных данных системы.

В ходе работы была смоделирована электрон-позитронная мишень, которая представлена на рисунке 2.

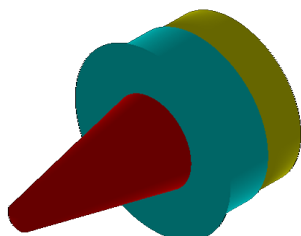


Рисунок 2 – Электрон-позитронная мишень, смоделированная в программном комплексе GEANT4

Важным критерием прохождения частиц сквозь материал является выход позитронов, распределение по энергии на выходе частиц, угол отклонения от первоначального направления электронов.

Число позитронов в максимуме электромагнитного ливня, рожденного электроном с энергией E, дается выражением (1).

$$N_{e^+} \approx \frac{0,15}{\sqrt{\ln(E/E_c) - 0,37}} \times \frac{E}{E_c} \quad (1)$$

Эта зависимость в большом диапазоне энергий близка к линейной, поэтому в качестве меры эффективности позитронного источника принято использовать величину Y (2).

$$Y = \frac{1}{E} \times \frac{N_+}{N_-} \quad (2)$$

Y – выход позитронов, N₋ – это количество падающих на мишень электронов, N₊ – число ускоренных позитронов [5].

На современных установках получен выход позитронов Y = 0,02 ÷ 0,06 ГэВ⁻¹.

В таблице 3 представлен сравнительный анализ результатов исследования материалов, применяемых для конверсионной мишени.

Таблица 3 – Результаты исследования

Материал	Число обр-зовавшихся позитронов	Выход позитронов Y, ГэВ ⁻¹	Энергия позитронов на выходе, МэВ
Вольфрам, W	3121	0,0012	60
Карбид бора, B ₄ C	144	0	252
Оксид алюминия, Al ₂ O ₃	1819	0,0009	236

Первый этап исследования материалов показал, что вольфрамовая составляющая мишени не может обеспечивать оптимальную проводимость частиц. В связи с этим необходим анализ поведения керамики несколько в других условиях работы. Для изучения керамики как материала, обеспечивающего максимальную проводимость частиц с наименьшим углом отклонения, была смоделирована конверсионная мишень нового типа (рисунок 3).

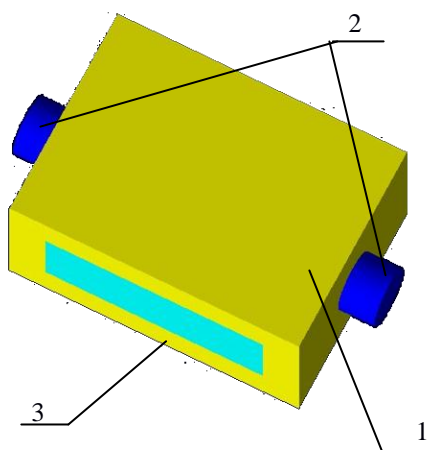


Рисунок 3 – Электрон-позитронная мишень со свинцовым носителем: 1 - корпус мишени, 2 - керамические окна, 3 - свинцовый носитель

В программе задаются дополнительные параметры нового материала – жидкого свинца:

- 1) $a = 207.2 \text{ g/mole}$; //Молярная масса свинца
- 2) $\text{density} = 9.81 \text{ g/cm}^3$; //Плотность свинца
- 3) $G4\text{double temp} = 601$; //Температура свинца по Кельвину
- 4) атомный номер 82

Мишень облучалась пучком 10^5 электронов с энергией 270 МэВ. В таблице 4 представлены полученные значения исследования керамики в мишени.

Таблица 4 – Результаты исследования керамики

Материал	Число позитронов	Энергия позитронов, МэВ	Максимальный угол отклонения от первоначального движения электронов, градус
Карбид бора, B_4C	99616	268	1,38
Нитрид бора, BN	99579	268	2,26
Оксид алюминия, Al_2O_3	98626	268	4,29

В результате исследования было установлено, что керамика удовлетворяет требованиям электрон-позитронной мишени.

Моделирование – это один из способов проведения исследования экспериментальной части работы. В ходе проведения исследования с помощью программы GEANT4 было выявлено, что мишень электрон-позитронной установки может быть изготовлена из керамики, которая удовлетворяет требованиям электрон-позитронной системы. Коэффициент пропускания позитронов составляет около 99 %, спектр позитронов характеризует керамику, как материал с достаточным выходом частиц.

Технология изготовления металлокерамического изделия.

Для изготовления конверсионной мишени необходимо получить соединение металл-керамика. Для решения данной задачи может быть использована сварка и пайка соединений. Конверсионная мишень работает при высоких температурах (около $300 \text{ }^\circ\text{C}$) под вакуумом при проходимости пучка электронов с энергией 270 МэВ, поэтому сварной шов должен обеспечивать высокую прочность соединения, выдерживать попадания пучка электронов плотностью до $2 \cdot 10^{12} \text{ ГэВ/мм}^2$. Одной из основных задач работы является получение надежного вакуум-плотного шва. Для решения этой задачи были предложены два способа соединения: электронно-лучевая сварка и пайка в атмосфере водорода.

Применение сварки или пайки в качестве технологического процесса соединения разнородных материалов металл – керамика должно быть выбрано с учетом условий работы изделия: высокие температуры эксплуатации ($300 \text{ }^\circ\text{C}$) при напряжениях (1 МПа за 1 с).

В таблице 5 отражены характеристики, определяющие выбор метода получения вакуум-плотного соединения.

Таблица 5 – Характеристика методов [6]

Метод	Температура излучения, °С	КПД, %	Автоматизация процесса	Оценка стоимости
Лазерная сварка	До 10 ⁶	0,1–2	Есть	Высокая
Диффузионная сварка	Нет излучения, нагрев материала (0,5–0,7) T _{пл}	-	Возможно	Доступная
Электронно-лучевая сварка	6000	90	Есть	Высокая

Электронно-лучевая сварка обеспечивает надежное соединение при малом пятне нагрева, что делает шов незначительно деформированным. Важным недостатком лазерной сварки заключается в том, что существует вероятность образования плазмы в месте нагрева. ЭЛС исключает эту возможность, а также влияние поглощающей способности материала и коэффициента отражения.

Поставленная задача решена за счет того, что коваровую деталь вначале отжигают в вакууме по режимам при температуре 850–900°С в течение 15–20 мин с охлаждением со скоростью 30–300 °С/мин до 600–800°С, после чего обезжиривают в этиловом спирте, а затем ковар подвергается окончательному отжигу при 1000–1100 °С в течение 30 минут. Перед соединением ковар-керамика необходимо подготовить пасту, состоящую из 95 % порошкового вольфрама с добавлением оксида ванадия (5%). Температура вжигания металлizationной пасты достигает 1650 °С. Немаловажным этапом получения вакуум-плотного соединения является выбор и правильное размещение припоя, для металло-керамики состав следующий: Ag (72 %) – Cu (28 %) и Ag (64 %) – Cu (26 %) – Sn (10 %), в которые вводили Ti (2–4 %). А затем керамику паяют в вакууме 10⁻²–10⁻³ Па со ступенчатым охлаждением в течение 3–5 мин при температуре 750–800°С и далее с печью до температуры 80–100°С за 120–360 мин [7].

Для пайки ковара с керамикой использовался конический тип соединения. Припой ПСР72

наносился в виде кольца на коническую поверхность керамики. Пайка проводилась в атмосфере водорода при температуре 800°С.

Конверсионная мишень представляет собой сложную систему, работающую в вакууме при высоких температурах. В процессе исследования удалось выявить несколько аспектов, требующих модернизации:

- неустойчивость мишени к термомеханическим нагрузкам;
- неспособность материала мишени выдерживать высокую интенсивность пучка электронов (2·10¹² ГэВ/мм² и более);
- получение сварного вакуум-плотного металлокерамического шва.

Так же были предложены пути модернизации процесса изготовления конверсионной мишени:

- термомеханические нагрузки на мишень возникают в результате тепловой ударной волны испускания пучка электронов. Рассмотренные керамические материалы способны выдерживать тепловой удар;
- современные установки испускают частицы с интенсивностью более 2·10¹² ГэВ/мм², что приводит к разрушению материала мишени; применение свинцового потока в конверсионной системе способствует устранению данной проблемы;
- в процессе конверсии частиц наблюдается угловое отклонение (до 134 градусов), использование свинцового ливня сокращает отклонение до 2-4 градусов;
- электронно-лучевая пайка дает возможность получить вакуум-плотное соединение металл-керамика.

Характеристики конверсионной мишени

В результате изучения условий эксплуатации мишени установлены следующие параметры:

- температура рабочей среды 300 °С;
- разнородные материалы системы;
- рабочее давление 10⁻²Па;
- взаимодействие с электронным пучком с числом частиц около 10⁶;
- энергия испускания электронов в пучке 270 МэВ.

Выбор материала для изготовления конверсионной мишени.

При заданных условиях работы мишени были подобраны материалы: вольфрам, нитрид бора, карбид бора, оксид алюминия. После проведения исследования данных материалов на конверсионную способность в программном комплексе GEANT4, выявлен ряд положительных свойств у керамики для использования в качестве материала окон конверсионной мишени. Керамика на основе

карбида бора удовлетворяет требованиям, предъявляемым к материалу окон мишени.

Результаты проведения моделирования конверсии мишени из керамики на основе карбида бора:

- угловое распределение (около 0,6 %);
- энергетическое распределение выхода частиц (0,5 %);
- выход позитронов $Y = 0,0009 \text{ ГэВ}^{-1}$;
- число образовавшихся позитронов составляет 99,6 %;
- энергия выхода частиц 268 МэВ.

Технология изготовления конверсионной мишени.

Сложность выбора технологии изготовления конверсионной мишени заключается в разнородности материалов. Далеко не каждый метод соединения удовлетворяет ряду требований, применяемых к получению вакуум-плотного шва. Однако следует отметить, что пайка в атмосфере водорода позволяет получать соединения металл – керамика для использования в конверсионных мишенях.

Научно-исследовательская работа была проведена с целью анализа материаловедческой основы изготовления мишеней для ускорителей элементарных частиц. Объектом исследования была выбрана конверсионная мишень. Проблема применения системы заключалась в большой мощности импульса, действующего на мишень, что может привести к ее разрушению. Поэтому важной задачей является выбор материалов с высокими физико-механическими показателями и разработка технологии их соединения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. A. Starostenko*, P. V. Logatchev, O. I. Meshkov, D. A. Nikiforov, A. V. Andrianov, A. E. Levichev, F. A. Emanov, K. V. Astrelina, M. F. Blinov, A. S. Tsyganov, D. E. Berkaev, I. A. Koop, D. Yu. Bolkhovityanov, and V. L. Dorokhov, Status and prospects of the injection complex of the Budker Institute of Nuclear Physics, Physics of Particles and Nuclei Letters 13(7):957-961·December 2016

2. Ковар. Свободная энциклопедия – 2016. (<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%80>).

3. Рабинович В.А., Краткий химический справочник [Текст]: учеб. для вузов / В.А. Рабинович, З.Я. Хавин – Л.: Химия – 1977. – 56 с.

4. Китайгородский, А.И. Введение в физику [Текст]: учеб. для вузов / А.И. Китайгородский. – М.: Наука – 1973. – 688 с.

5. Багаев, К.А. Метод 3D-моделирования прохождения гамма-квантов и электронов через вещество и его применение в физических экспериментах [Текст]: дис... канд. физ.-мат. наук: 01.04.16: защищена 2012. / Багаев Кирилл Александрович. – СПб., 2012. – 187 с.

6. Демичев, С.Ф. Технология и оборудование сварочного производства [Текст]: учеб. пособие / С.Ф. Демичев, А.В. Рясный, А.Л. Усольцев. – Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – 2010. – 38 с.

7. Способ изготовления и термической обработки деталей из алюмооксидной керамики и прецизионных сплавов электроракетных двигателей малой тяги [Текст]: пат. 2220832 Рос. Федерация: МПК В23К31/02, УТарасов А.Н.; заявитель и патентообладатель Спб, Фед. гос. унитарное предприятие "Опытное конструкторское бюро "Факел", науч. - заявл. 08.08.01; опубл. 20.08.03.

Никифоров Алексей Гранитович,
к. ф-м. н, доцент каф. «Современные специальные технологии» АлтГТУ, тел. 8(963)573-29-08

Евдокимова Юлия Сергеевна, магистрант, студент кафедры «Современных специальных технологий» АлтГТУ, тел. 8(962)799-43-91