

**МИНИСТЕРСТВО
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное агентство
по образованию**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

физический факультет

**Квалификационная работа на соискание
степени бакалавра
Кафедра физики плазмы**

Петенев Юрий Владимирович

**Экспериментальное исследование образования капилляра в металле под
действием сильнофокусированного низкоэнергетического электронного пучка**

**Научный руководитель:
канд. физ.-мат. наук,
зав. лаб. 5-1 ИЯФ СО РАН
П.В. Логачёв**

Новосибирск – 2008 год

1. Введение

Физика электронных пучков служит исходным пунктом для промышленных разработок. В течение последних 70 лет сформировалась еще одна научно-техническая область – электронно-лучевая технология. В этой области электронные пучки непосредственно используются для осуществления технологических процессов. Возможные применения электронно-лучевой технологии от получения субмикроскопических структур в микроэлектронике до выплавки крупных слитков в металлургии. Общим для всех этих установок является использование электронных пучков.

Выделение электронно-лучевой технологии в самостоятельную отрасль научно-технических знаний тесно связано с успехами электронной оптики.

Первые попытки электронно-лучевой плавки были предприняты в 1905г. Удалось плавить даже такие тугоплавкие металлы, как тантал.

С середины 20-х годов начинается бурное развитие электронной оптики. Для фокусировки пучков начали использовать магнитные линзы.

В 1950г. были показаны технологические возможности электронного пучка, как инструмента для получения отверстий и прецизионной обработки поверхностей. Появилась необходимость использования нового технологического способа для таких целей, как сварка, плавка и напыление.

Приблизительно к 1965г. способы и установки электронно-лучевой технологии достигают такой степени технического совершенства, что электронно-лучевую плавку, сварку, напыление и обработку поверхностей можно считать внедренными в промышленность.

В последние годы масштабы этого внедрения возросли. Кроме того, освоены и другие области применения, например, нетермическая электронно-лучевая обработка микроструктур и химическая электронно-лучевая обработка синтетических материалов и покрытий в промышленных масштабах.

В настоящее время актуальна проблема кильватерного ускорения. Известно, что при воздействии электронного пучка, энергии порядка 50 кэВ, с поверхностью металла образуется капилляр, то есть узкий и глубокий канал, с плазмой. В ИЯФ СО РАН была предложена идея по использованию такого капилляра для кильватерного ускорения. Если в металлическом образце (толщиной ~5 см для стали) удастся образовать сквозной капилляр с плазмой, плотностью порядка 10^{15} см^{-3} [6], который будет устойчив на протяжении десятков микросекунд, и направить в него высокоэнергетичный пучок заряженных частиц, то в плазме капилляра будет образовываться сильное продольное электрическое поле, в котором этот пучок будет ускоряться до энергии в несколько десятков ГэВ [5].

Целью этой работы было исследование процесса образования капилляра при воздействии электронного пучка энергии 60 кэВ и диаметром 0.5-2 мм, с поверхностью различных материалов – вольфрама, стали и свинца, и исследование применимости такого капилляра для кильватерного ускорения.

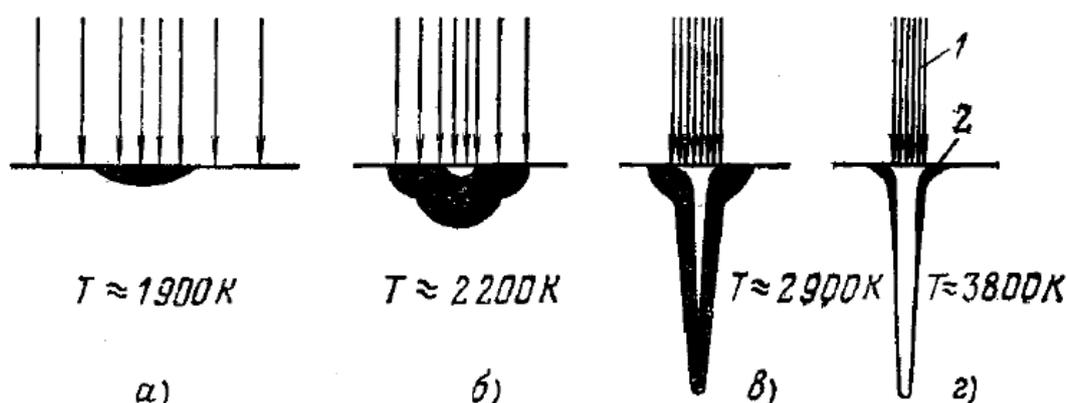
2. Теоретическая часть

2.1. Физические основы электронно-лучевой сварки

Основы теории электронно-лучевой сварки, а так же многочисленные эмпирические данные собраны в работе [2].

При электронно-лучевой сварке кинетическая энергия электронов пучка используется для того, чтобы расплавить металл. В поверхностном слое выделяется энергия пучка. Положительной стороной метода является возможность создания высокой плотности энерговыделения в пятне пучка. Она позволяет создавать глубокие каналы в металле при относительно не большом диаметре провара.

При достаточной поверхностной плотности мощности (далее поверхностной мощности) электронного пучка на поверхности металла появляется ванночка с расплавом. Если пучок имеет достаточную фокусировку, то над поверхностью расплава появляется локальная область повышенного давления пара. При взаимодействии давления пара с расплавом, формируется равновесная вогнутая форма поверхности. Пятно пучка смещается вглубь образца, происходит прогрев более глубоких слоёв металла (рис. 1).



а — ванночка расплава; *б* — начало деформации ванночки под действием давления пара; *в* — образование парового капилляра с жидкометаллическим слоем (эффект глубокой сварки); *з* — канал после выброса расплава; *1* — пучок; *2* — поверхность детали.

Рис. 1 Образование парового капилляра и слоя расплава в стальном изделии при увеличении поверхностной мощности пучка. Иллюстрация из работы [2].

При достаточной поверхностной мощности пучка этот механизм может привести к образованию капилляра. В этом случае за счёт давления пара, образующегося в области контакта пучка и дна капилляра, расплав выбрасывается из углубления. При увеличении глубины капилляра поверхностная мощность на дне падает из-за торможения и рассеяния пучка. На некоторой глубине ее становится не достаточно для поддержания дальнейшего выдавливания жидкости. Таким образом, углубление капилляра начинает происходить только за счет испарения металла, скорость образования капилляра резко падает на 2-3 порядка с метров до сантиметров в секунду [4].

Скорость образования капилляра [4]:

$$V = \frac{q}{\Delta H + C_p \Delta T} \quad (1),$$

где C_p - теплоемкость металла, $\Delta T = T_{пл.} - T_0$ ($T_{пл.}$ - температура плавления металла, T_0 - начальная температура образца), q - поверхностная плотность мощности, ΔH - удельная теплота плавления. Для стали $\Delta H + C_p \Delta T = 1$ кДж [7]. При поверхностной плотности мощности равной $\sim 5 * 10^7$ Вт/м², скорость образования капилляра составляет 6-7 м/с.

2.2. Силы, действующие на капилляр

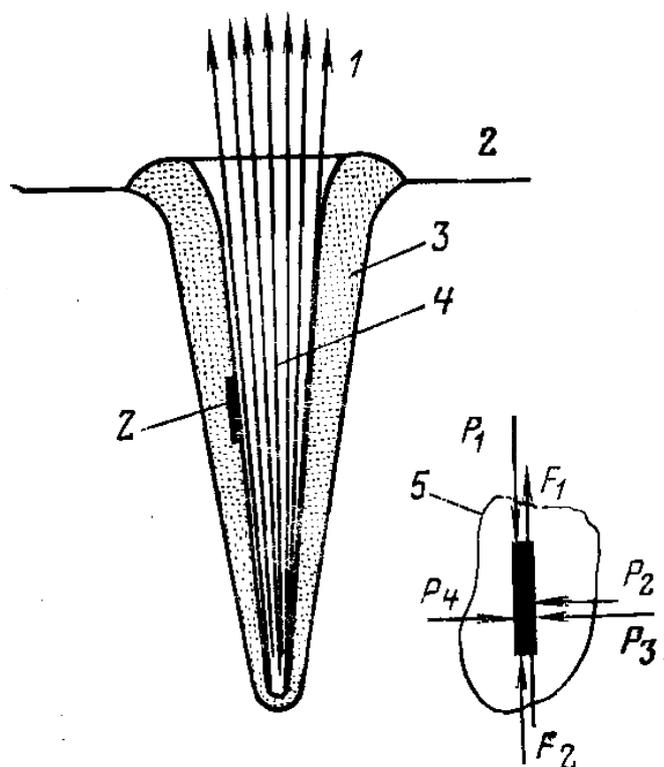


Рис. 2. Силы, действующие на элемент объема слоя расплава Z, расположенный у его поверхности, обращенной к капилляру: 1 – поток пара; 2 – поверхность детали; 3 – расплав; 4 – паровой капилляр; 5- элемент Z.

Паровой капилляр окружен слоем расплава, который подвержен действию ряда сил (рис. 2). Гидростатическое давление P_1 зависит от высоты вышележащего столба жидкости, от ее плотности и от угла между направлением силы тяжести и направлением оси капилляра. Поверхностное натяжение P_2 падает с увеличением радиуса кривизны поверхности и с ростом температуры расплава и зависит от материала.

Основной причиной образования капилляра является давление пара P_3 и P_4 на внутреннюю поверхность рассматриваемого элемента объема. Давление пара начинает играть особенно важную роль при возникновении перегрева слоев материала объекта, лежащих под его поверхностью. С поверхности расплава происходит испарение материала, образуется поток пара (1), направленный к верхней части капилляра, возникают тангенциальные силы в направлении потока пара. Градиенты температуры вызывают появление подъемной силы F_2 .

Совокупность всех сил, включая и действующие на элемент объема силы инерции и трения F_1 , определяет форму капилляра. Изменение хотя бы одной из компонент этой совокупности сил может изменить форму капилляра. На практике оказывается, что геометрия парового капилляра и окружающего его жидкого материала в общем случае испытывают быстрые и сильные периодические колебания относительно некоторого среднего состояния.

3. Экспериментальная часть

3.1. Электронно-оптическая колонна



Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки во время работы.

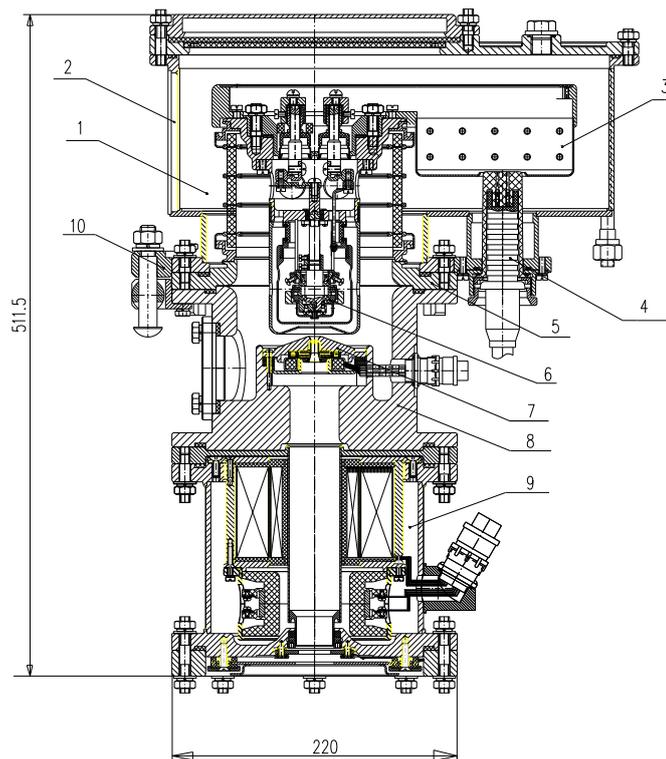


Рис. 4. Общий вид электронно-оптической колонны: 1 – бак катодного блока, заполненный жидким изолятором, 2 – рубашка охлаждения бака катодного блока, 3 – блок накального трансформатора с выпрямителем, 4 – высоковольтный ввод, 5 – основной фланец пушечного узла, который открывается для замены картриджа, 6 – сменный картридж с катодом, 7 – анодный блок с корректором, 8 – узел крепления к манипулятору, 9 – охлаждаемый блок магнитного управления пучком, 10 – шарнир открытия катодного блока для замены картриджа.

Электронно-оптическая колонна (рис. 4) предназначена для формирования электронного пучка и состоит из катодного блока, находящегося под высоким напряжением отрицательной полярности, узла крепления к манипулятору с встроенным в него анодным блоком, а также блока магнитного управления пучком.

Эмитирующая поверхность катода имеет форму круга и выполнена из танталовой фольги толщиной 0.2 мм. Катод разогревается проходящим через него током до температуры выше 2000°С, при этом неравномерность нагрева эмитирующей поверхности не превышает нескольких десятков градусов. Быстрое управление величиной тока пучка осуществляется подачей на управляющий электрод отрицательного относительно катода напряжения величиной до 4 кВ, таким образом, при уменьшении этого напряжения можно увеличивать ток пучка. Форма и взаимное расположение всех электродов, включая катод и анод, определяет электронную оптику системы.

Катодный узел установлен на секционированном высоковольтном изоляторе, к которому также прикреплен блок накального трансформатора с выпрямителем. Катодный узел, секционированный высоковольтный изолятор, блок накального трансформатора и высоковольтные разъёмы вместе образуют катодный блок, находящийся в баке с трансформаторной силиконовой жидкостью. Бак катодного блока имеет рубашку охлаждения с проточной трансформаторной силиконовой жидкостью.

Катод и прикатодный электрод смонтированы в одном узле, который называется катодным картриджем. Это сделано для упрощения процедуры замены катода. Картридж и катод выполнены достаточно точно, чтобы после замены катода не требовалось никакой выставки элементов и юстировки пучка. Внешне картридж аксиально симметричен, однако, желательно устанавливать его в определенном азимутальном положении, чтобы при замене катода не менять токи в двухкоординатном анодном корректоре.

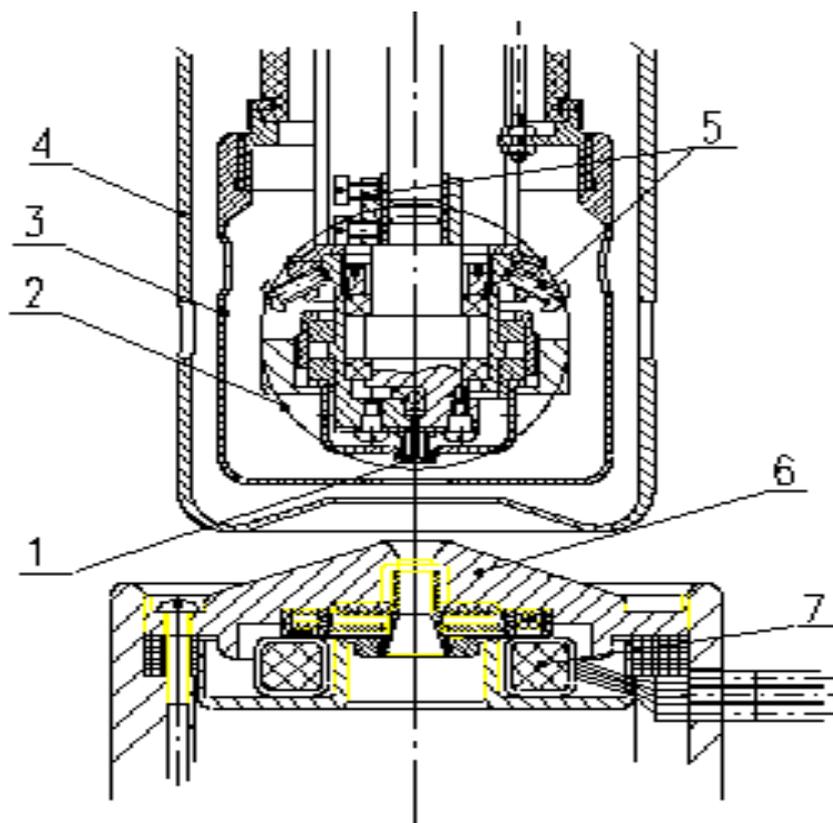


Рис. 5. Конструкция электронной пушки: 1 – катод, 2 – катодный картридж, 3 – управляющий электрод, 4 – охранный электрод, 5 – крепление катодного картриджа, 6 – анодный электрод, 7 – двухкоординатный анодный корректор.

Анодный электрод (рис. 5) представляет собой отдельный блок, в который вмонтирован двухкоординатный магнитный корректор, для компенсации влияния на электронный пучок магнитного поля накала катода. Анодный блок встроен в массивный узел крепления всей электронно-оптической колонны к манипулятору. Узел крепления имеет с трёх сторон отверстия диаметром порядка 5 см для вакуумной откачки пространства катод-анод, а также для контроля вакуума.

3.2. Блок управления пучком

После анодного блока располагается блок управления пучком (рис. 6), который обеспечивает фокусировку и отклонение луча. Фокусировка электронного пучка осуществляется аксиальной бронированной магнитной линзой. Эта линза имеет две обмотки: статическую и динамическую. Статическая обмотка помещена в железное ярмо и обеспечивает медленно меняющуюся составляющую суммарного магнитного поля линзы. Динамическая обмотка расположена вне железного ярма линзы, ближе к оси системы, и, соответственно, имеет меньшую индуктивность, что позволяет быстро изменять ток в ней.

Динамическая обмотка позволяет быстро перемещать точку фокуса луча вдоль оси системы.

За фокусирующей линзой располагается двухкоординатная отклоняющая катушка, обеспечивающая отклонение пучка в телесном угле до 7^0 от оси пучка. Корректор состоит из двух косинусных обмоток с ферритовым экраном, что обеспечивает хорошую однородность поля внутри большой апертуры. Отклоняющая катушка имеет небольшую индуктивность, что позволяет манипулировать пучком с частотой до 2 кГц.

После прохождения блока управления, пучок попадает в вакуумную камеру, на дне которой располагается мишень. В камере поддерживается вакуум порядка 10^{-4} Па, для чего

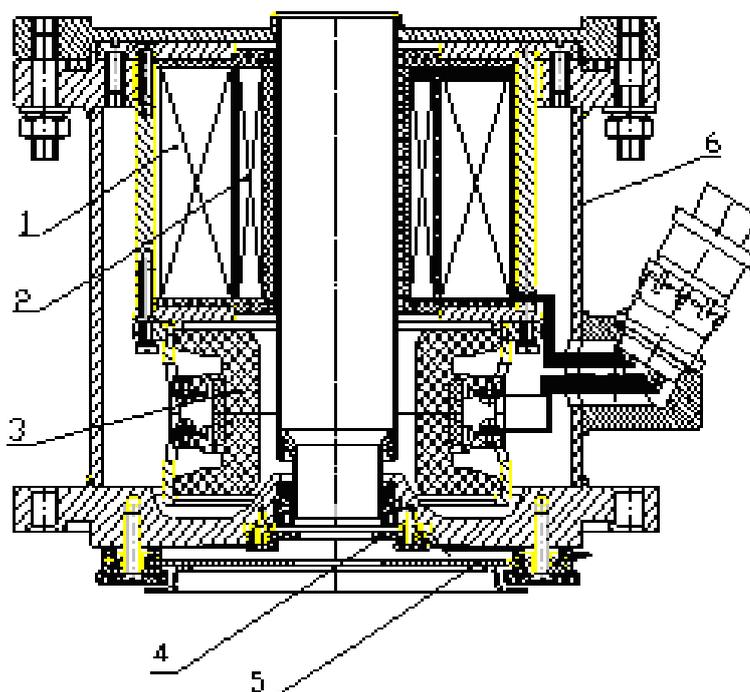


Рис. 6. Блок управления пучком: 1 – обмотка статической фокусировки, 2 – обмотка динамической фокусировки, 3 – двухкоординатная отклоняющая катушка, 4 – электрод контроля токооседания, 5 – датчик вторичных электронов, 6- охлаждаемый корпус.

используются три насоса – турбомолекулярный, установленный на анодном блоке, паромасленный, расположенный под вакуумной камерой и форвакуумный насос, служащий для получения форвакуума порядка 1 - 10 Па и поддержания работы турбомолекулярного и паромасленного насосов.

3.3. Описание эксперимента

Целью поставленного эксперимента было измерение времени образования сквозного капилляра в стальном и вольфрамовых образцах, так же необходимо было определить, как

ведет себя диаметр капилляра на разной глубине. Схема эксперимента изображена на рисунке 7.

В вакуумной камере поддерживается давление порядка $5 \cdot 10^{-4}$ Па. Сфокусированный на поверхность мишени электронный пучок выходит из электронно-оптической колонны и движется по вертикали. Расстояние от катода до мишени порядка 80 см. Энергия электронов в пучке 60 кэВ, ток пучка до 0,5 А, диаметр пучка 0,5-2 мм. Пучок попадает на мишень. Она установлена на керамических изоляторах (рис. 4). Под мишенью расположена молибденовая пластина-электрод. Мишень и пластина заземлены через сопротивления 56 Ом. Напряжения на сопротивлениях регистрируются осциллографом Tektronix. Таким образом, измеряются два сигнала с мишени и с пластины. В случае образования сквозного отверстия в мишени, на пластине должен появиться электрический ток. И таким образом по временной задержке между двумя сигналами с мишени и с пластины можно определить время пробивания образца или, если образец проткнуть не удалось, сделать выводы, что, например, тока или длительности пучка не достаточно, и повторить эксперимент с другими параметрами пучка. В эксперименте использовались мишени из различных материалов: свинец, вольфрам и сталь.

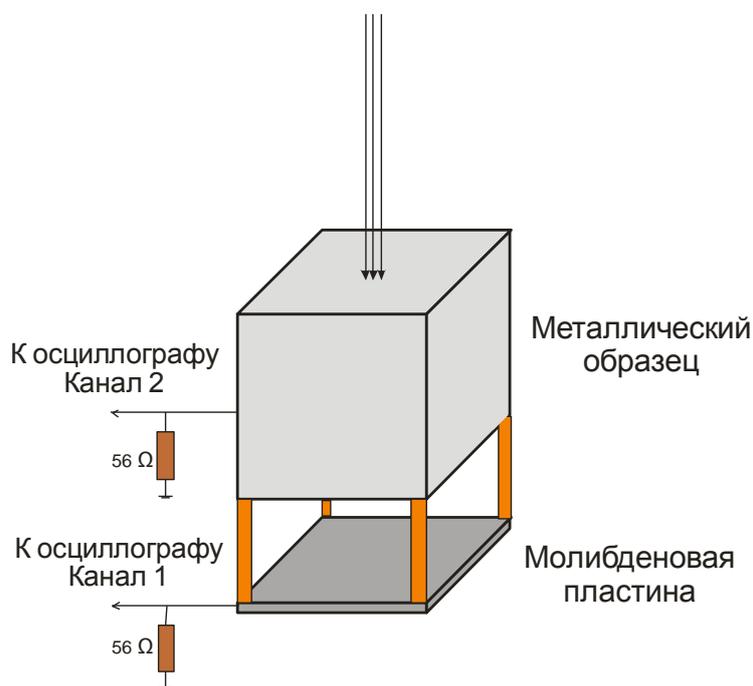


Рис. 7. Схема эксперимента.

В вакуумной камере имеется окошко, за которым располагается камера, которая передает изображение на экран телевизора. Таким образом, можно наблюдать то, что происходит в вакуумной камере во время эксперимента. Перед экспериментом производилась фокусировка пучка, для этого в вакуумную камеру на место мишени устанавливалась металлическая пластина размером 50x50 мм и толщиной 3 мм. После чего

на нее направлялся пучок с небольшим током, порядка 5 мА. Затем подбирался такой ток в фокусирующей линзе, чтобы свечение пучка было максимальным. Так же производилась настройка формы пучка. Для этого на такую же пластину направлялся расфокусированный пучок с диаметром порядка одного сантиметра и током 40 мА. Затем изменением тока в анодном корректоре достигалась круглая форма пятна пучка.

4. Результаты измерений

4.1 Эксперимент по сквозному пробиванию стали

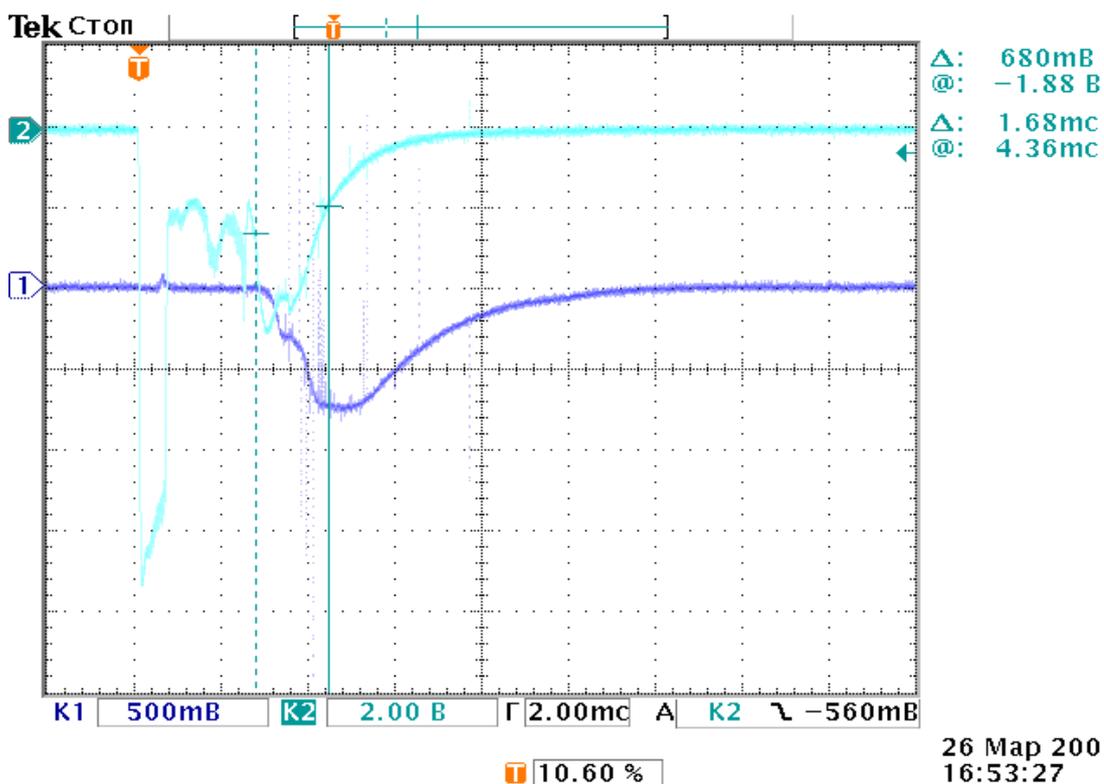


Рис.8. Напряжения на стальном образце (верхняя кривая) и пластине (нижняя кривая).

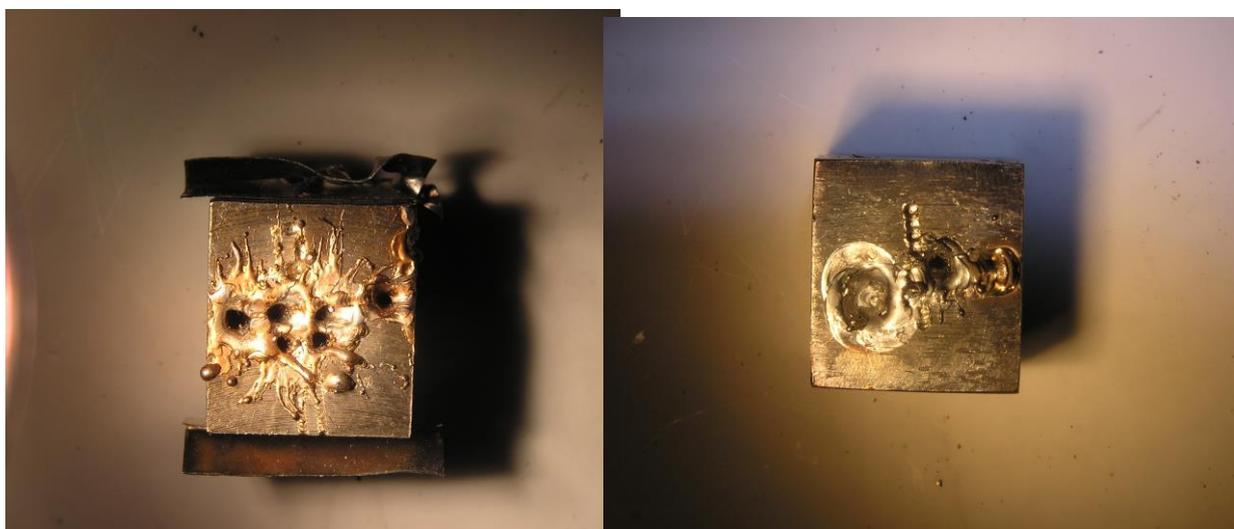


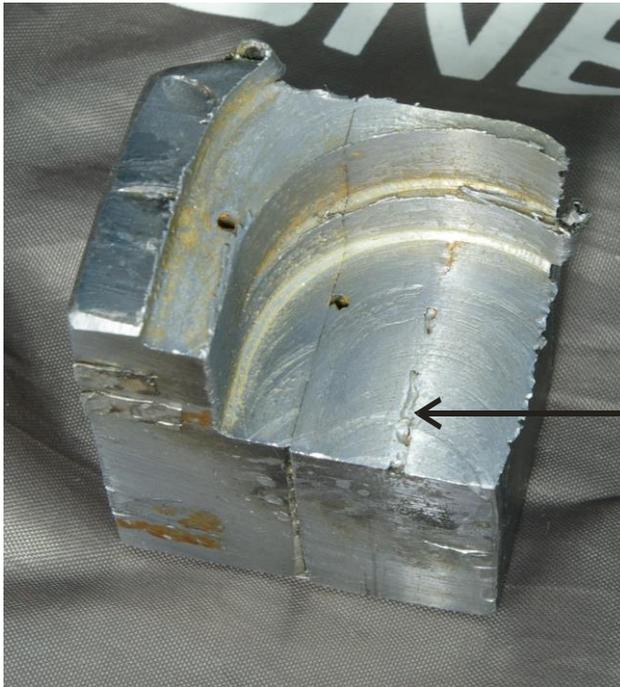
Рис.9. Фотографии использовавшихся стальных образцов размером 20x20x20 мм.

Была проведена серия выстрелов по стальным образцам размером 2x2x2 см. По образцам производились одиночные выстрелы пучком электронов, предварительно сфокусированным на поверхность мишени, с энергией 60 кэВ, длительностью 10 мс и различными токами (50-100 мА). Диаметр сфокусированного пучка при токе 100 мА равен 0.6-0.7 мм. После каждого выстрела пучок смещался по поверхности образца, изменением тока в отклоняющей катушке, на достаточное расстояние, чтобы при следующем выстреле не было воздействия капилляра, оставшегося от предыдущего выстрела.

На рисунке 8 представлены осциллограммы напряжения на образце и пластине под ним, при падении на образец пучка электронов с энергией 60 кэВ, током 100 мА и длительностью 10 мс, пучок проделал сквозное отверстие диаметром 0.6 ± 0.1 мм. По нижней кривой можно оценить время образования отверстия в образце ~ 3.2 мс и вычислить скорость образования отверстия ~ 6.2 м/с. На рисунке 9 изображены стальные образцы, использовавшиеся в эксперименте. На этих фотографиях видно, что вещество выплескивалось наружу в виде капель. После эксперимента в вакуумной камере были обнаружены шарики диаметром порядка 1 мм.

4.2 Диаметр капилляра на разной глубине

Был проведен эксперимент по оценке диаметра капилляра на разной глубине, в качестве мишени использовался стальной образец высотой 5 см. (Рис. 10). По образцу было произведено 2 выстрела с одинаковыми параметрами пучка (ток 500 мА, длительность 100 мс, диаметр $\sim 1.7-1.8$ мм). После чего образец был отфрезерован на разные глубины (5 и 20 мм).



След от капилляра.

Рис. 10. Фотография стального образца, отфрезерованного после эксперимента.

Диаметры капилляров на глубине 5 и 20 мм совпадают и равны ~ 1.7 мм. Пучком с такими параметрами не удалось пробить насквозь 5 см стали. Было пробито порядка 3 см.

Так же на рисунке 10, совершенно случайно после фрезеровки был обнаружен след от капилляра, образовавшегося в предыдущих экспериментах по сквозному пробиванию стали. Форма этого капилляра извилистая, что говорит о неравномерности процессов, при образовании капилляра, о которых говорилось выше в теоретической части.

4.3 Эксперимент по сквозному пробиванию вольфрама

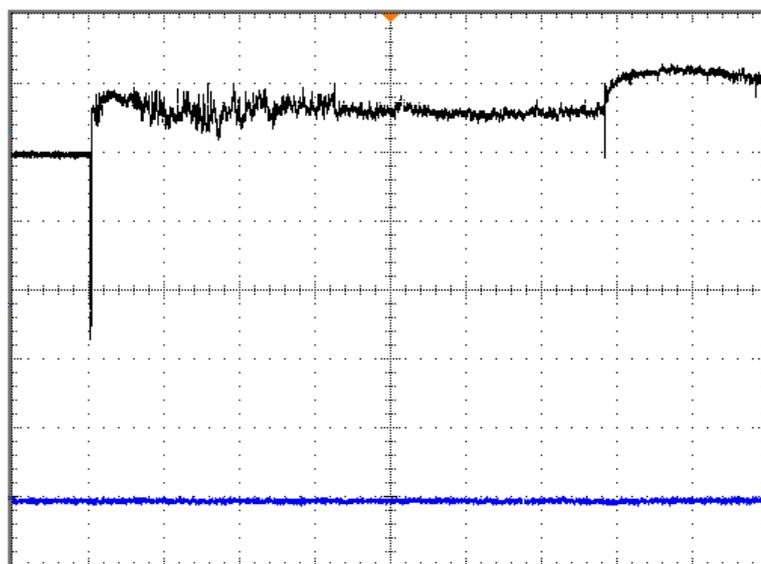


Рис.11. Напряжения на вольфрамовом образце (верхняя кривая) и пластине (нижняя кривая). Одна клетка 2В и 10 мс.

Была проведена серия экспериментов по сквозному пробиванию вольфрамового образца размером 10x10x10 мм. Эксперименты проводились при фиксированном токе пучка – 100 мА, но разной длительности 30-70 мс.

На рисунке 11 представлена осциллограмма напряжения на образце и пластине под

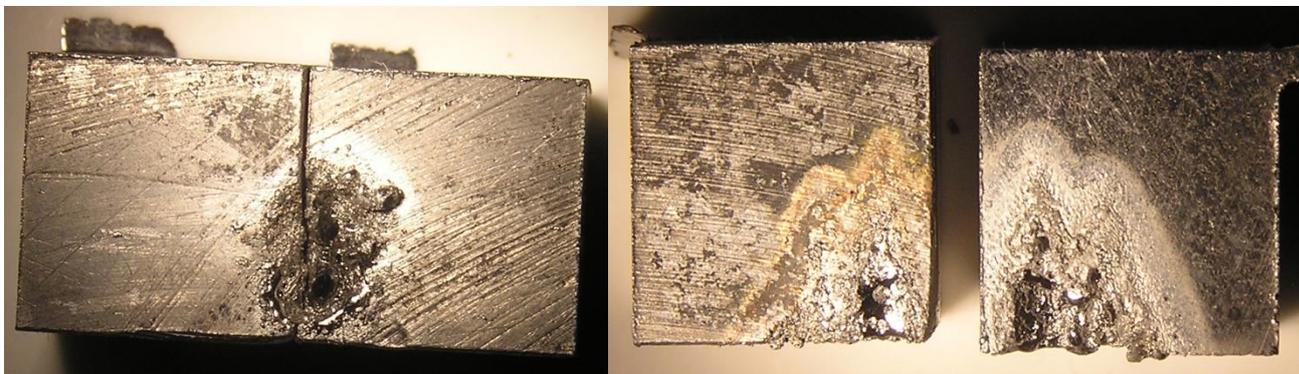


Рис.12. Фотография использовавшегося вольфрамового образца размером 10x10x10 мм.

ним при падении на образец пучка электронов с энергией 60 кэВ, током 100 мА и длительностью 70 мс. Пучком с такими параметрами не удалось проделать сквозное отверстие. На поверхности образца так же, как и в экспериментах со сталью, наблюдались застывшие капли. Были образованы отверстия диаметром ~0.8 мм и глубиной ~6 мм. На рисунке 12 изображены вольфрамовые образцы, использовавшиеся в эксперименте.

4.4 Эксперимент по сквозному пробиванию свинца

Был проведен эксперимент по сквозному пробиванию свинца. В качестве мишени использовался свинцовый образец, высотой 30 мм (Рис. 13). По образцу было произведено два выстрела:

1. Левое отверстие на рисунке 13. Ток пучка 280 мА, длительность 30 мс. В результате взаимодействия такого пучка со свинцовым образцом образовалось сквозное отверстие, диаметром 7 мм.
2. Правое отверстие на рисунке 13. Ток пучка 150 мА, длительность 30 мс. Сквозное отверстие получить не удалось, было получено отверстие, диаметром ~5.5 мм и глубиной ~17 мм.



Рис.13. Фотография свинцового образца, использовавшегося в эксперименте.

5. Выводы

1. Проведены эксперименты по взаимодействию электронного пучка с образцом из стали. Пучком с имевшейся мощностью, длительностью и диаметром (6кВт, 10мс и 0,5 мм) можно проделать отверстие в кубике стали со стороной 2см, время образования отверстия составляет 3.2 мс. Скорость образования отверстия совпадает с теоритической моделью [4] и равна ~ 6 м/с, при поверхностной плотности мощности пучка порядка $5 * 10^7$ Вт/м².

2. Проведены эксперименты по оценке диаметра капилляра, образовавшегося после взаимодействия электронного пучка (ток 500 мА, длительность 100 мс) со стальным образцом, на разной глубине. Диаметр капилляра одинаковый на высоте 5 и 20 мм, и примерно совпадает с диаметром пучка – 1.7 мм.

3. Проведен эксперимент по сквозному пробиванию вольфрама. Пучком с током 100 мА и длительностью 70 мс вольфрамовый образец, высотой 10 мм проткнуть не удалось. Пучок с такими параметрами протыкает около 6 мм вольфрама.

4. Проведен эксперимент по сквозному пробиванию свинца. Пучком с током 280 мА и длительностью 30 мс можно пробить 30 мм свинца, но образуется отверстие диаметром 7 мм.

5. Имеющимся в настоящее время пучком электронов не удастся пробить 5 см стали за время порядка нескольких десятков мс. Капилляр, образующийся под действием имеющегося пучка электронов, не пригоден для использования в кильватерном ускорении, так как он имеет слишком большой диаметр и плотности плазмы, образующейся в нем ($\sim 10^{14}$ см⁻³ [4]) не достаточно. Для применения капилляра в кильватерном ускорении необходимо, чтобы у него был диаметр порядка 0.1 мм и в нем была плазма с плотностью $\sim 10^{15}$ см⁻³.

6. Список литературы

1. Тормозная способность электронов и позитронов. Доклад 37 МКРЕ. Под редакцией И.Б.Кеирим-Маркуса. Москва. Энергоатомиздат, 1987.
2. З.Шиллер, У.Гайзиг, З.Панцер. Электронно-лучевая технология. Энергия, 1980.
3. Химическая энциклопедия, Т.1. Советская энциклопедия, 1988.
4. Аракчеев А.С. Теория образования парового капилляра в металле под действием сильнофокусированного низкоэнергичного электронного пучка. Квалификационная работа на соискание степени бакалавра. ИЯФ СО РАН, 2008.
5. А.В. Бурдаков, А.М. Кудрявцев, П.В. Логачев, К.В. Лотов, А.В. Петренко, А.Н. Скринский. Проект эксперимента по кильватерному ускорению на инжекционном комплексе ВЭПП-5. Физика плазмы, том 31, № 4, 2005.
6. K.V. Lotov, V.S. Tikhonovich. Numerical optimization of a plasma wakefield acceleration experiment. Physical review special topics – accelerators and beams 10, 2007.
7. Н.Н. Рыкалин, И.В. Зуев, А.А. Углов. Основы электронно-лучевой обработки материалов. Москва. Машиностроение, 1978.