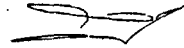


На правах рукописи



КОНЮШКОВ Владимир Геннадьевич

**СОЕДИНЕНИЕ УЗЛОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ
МЕТОДОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА
ПРОСЛОЕВ В ВАКУУМЕ**

Специальность 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Саратов 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
«Саратовский государственный технический университет»

- Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
Балакин Александр Николаевич
- Официальные оппоненты - заслуженный деятель науки РФ, доктор
физико-математических наук, профессор
Синицын Николай Иванович
заслуженный деятель науки РФ, доктор
технических наук, профессор
Быстров Юрий Александрович
- Ведущая организация - ОАО «НПП «Контакт» (г. Саратов)

Защита состоится «17» мая 2010 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.242.01 при ГОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет» по адресу:


410054, Саратов, ул. Политехническая, 77, Саратовский государственный технический университет, корп. 1, ауд. 319.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Саратовского государственного технического университета.

Автореферат размещен на сайте: www.sstu.ru 16 апреля 2010 г.

Автореферат разослан «16» апреля 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

 Димитрюк А.А.

2010А
14858

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие и совершенствование современной электронной промышленности невозможно представить без применения новых конструкционных материалов на основе керамики, ситаллов, кварца, ферритов и других неметаллических материалов. Эти материалы созданы на основе оксидов различных элементов и обладают уникальными физико-химическими свойствами.

Соединения этих материалов с металлами и друг с другом широко применяются для соединения оболочек и корпусов металлокерамических и стеклометаллических узлов электроопных, газоразрядных и газонаполненных приборов, фазовращателей, циркуляторов, резонансных ветвилей и других узлов в приборах СВЧ и антенно-фидерных устройств, для фотокатодов в приборах ночного видения, корпусов лазерных гироскопов. Традиционные методы получения таких соединений — склеивание и пайка — далеко не всегда обеспечивают высокую прочность, вакуумную плотность, термостойкость, надежный тепловой и электрический контакт, сохранение свойств приборов при длительном хранении.

Методы соединения с высокоинтенсивным воздействием параметров — сварка взрывом, ударная сварка в вакууме, магнитоимпульсная сварка, вакуумно-термическая магнитоимпульсная обработка не могут найти реального применения для изготовления узлов на основе неметаллических материалов.

Наиболее перспективным методом изготовления таких узлов является диффузионная сварка в вакууме (ДСВ). Однако в последние годы возникают задачи, которые практически невозможно решить в рамках традиционных технологических воздействий параметров ДСВ. Не известны работы по сварке неметаллов с металлами указанными выше способами, в том числе и ДСВ.

Соединение этих материалов с использованием электрического взрыва прослов в вакууме весьма перспективно для соединения в твердом состоянии различных металлов, металлов с неметаллическими конструкционными материалами, а также этих материалов друг с другом для изготовления новых и совершенствования существующих электроопных и газоразрядных приборов.

Существенный вклад в развитие принципиальных схем процессов и технологий внесли А.И.Коблов, А.Н. Балакин, Р.А. Мусин.

Процесс электрического взрыва проводников является достаточно сложным, связанным прежде всего с динамикой нагрева и взрыва проводников. Впервые эти процессы рассмотрены в монографии В.Г. Чейса и в основном для проволочных проводников.

В литературе эти процессы исследованы недостаточно, для плоских проводников они практически не изучались.

Целью работы является разработка новых технологических принципов изготовления узлов электронных приборов на основе неметаллов по электрически взрываемым прослоям в вакууме и исследование физических явлений при взрыве.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать возможности применения высокоинтенсивных методов соединения материалов в твердом состоянии для получения качественных соединений конструкционных неметаллических материалов (керамик, ферритов, ситаллов, кварцевых стекол и др.) с металлами и друг с другом; выбрать основные схемы процесса, описывающие физические явления при взрыве и соединении;
- предложить схему процесса соединения материалов в твердом состоянии через электрически взрываемые прослойки при пониженных температурах и давлениях;
- исследовать физические закономерности электрического взрыва прослоев и разработать перколяционную модель взрыва для определения его параметров на основе перколяционной модели;
- установление кристаллографических аспектов процесса формирования прослоя после взрыва и взаимодействия конструкционных неметаллов с металлами;
- рассчитать влияние термомеханических характеристик прослоев на термоупругие напряжения соединений;
- разработать специальное оборудование, технологические процессы изготовления узлов приборов и апробировать их.

Работа выполнялась в соответствии с программой совместных исследований и разработок ОЛО «НПП «Контакт» и СГТУ, госбюджетной работой № 241 СГТУ.

Методы и средства исследований.

Научные и технические разработки проводились с использованием теоретических основ вакуумной техники с использованием современных методов исследований, контрольно-измерительных приборов и математического аппарата.

Достоверность теоретических положений подтверждена экспериментальными результатами, а также апробацией их данных.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту:

- Разработанные технологические основы соединения по электрически взрываемым в вакууме металлическим и стеклянным прослоям на основе колебательного контура позволяют вводить энергию непосредственно в зону контакта и изготавливать узлы приборов из материалов, которые

ранее не соединялись при уменьшенных до 300-400°C температурах и давлениях 10-12 МПа без применения драгметаллов.

- Предложенная схема процесса соединения материалов через электрически взрывааемые прослойки последовательно описывает три стадии электрического взрыва проводника и физико-химические процессы на каждой стадии и представляет процесс в форме, удобной для технологического анализа.

- На основе разработанной перколяционной модели и экспериментальных результатов предложена следующая физическая картина электрического взрыва прослойки: так как электрическое сопротивление границ зерен значительно больше сопротивления в объеме, то плавление начинается с границы зерен, распространяется вглубь, образуя кластеры пустот, объединяющиеся в разрывной кластер, при этом сопротивление растет, и ток перестает течь по цепи.

- Плавление и последующая кристаллизация прослойки приводят к переориентации предпочтительных кристаллографических направлений в кристаллах металлической прослойки к решетке неметаллического материала на уровне наноразмеров, что обеспечивает формирование качественных соединений до уровня прочности одного из соединяемых материалов.

Научная новизна работы:

- Установлено, что по сравнению со всеми известными методами соединения материалов в твердом состоянии метод соединения по взрывающимся прослойкам в вакууме перспективен для получения качественных узлов существующих и новых электровакуумных приборов при уменьшенных до 0,3-0,4 $T_{пл}$ температурах и удельных давлениях меньше предела текучести.

- Предложена перколяционная модель протекания тока через прослойку, качественно подтвержденная экспериментальными результатами.

- Предложена методика расчета электрических параметров колебательного контура, оценивающая зависимость сопротивления проводника, тока в цепи разряда и напряжение на батарее конденсатора от времени, что позволяет с учетом сопротивления прослойки рассчитать электрические параметры взрыва.

- Установлено, что после электрического взрыва и кристаллизации прослойки происходит переориентация предпочтительных направлений в кристаллах прослойки к решетке неметаллического материала, что свидетельствует о подстройке решеток на уровне наноразмеров.

- Показана возможность соединять материалы и узлы приборов из неметаллических электровакуумных материалов друг с другом следующих пар материалов: ситалл-ситалл, кварц-кварц, ситалл-кварц, ферриты-ферриты через прослойку из сплава 47НД, пьезокерамика+пьезокерамика.

Практическая значимость.

- Разработанные режимы соединения керамики с металлами рекомендованы в ОАО «НПП «Контакт» при изготовлении металлокерамических узлов следующих типов приборов: тиратроны газоразрядные импульсные типа ТГИ-1000, ТГИ-2000, ТГИ-5000; мощные генераторные лампы (МГЛ) типа ГУ-53, ГИ-64.

- Разработанные режимы соединений ферритов гранатов, 40СЧ2, 30СЧ6 и ферритошпинелей 10СЧ8 с металлами и керамикой внедряются в ЗАО ППК «Феррит-Квазар» при изготовлении электронных приборов следующих типов: резонансных вентиляей, циркуляторов и фазовращателей.

- Разработанные режимы апробированы при герметизации корпуса лазерного гироскопа из кварцевого стекла КУ-1 с заглушкой из ситалла СО115М.

Рекомендации диссертации использованы в госбюджетной работе №241 «Разработка теоретических основ формирования вакуумных эмиссионных характеристик электронных приборов, сварных соединений и покрытий на основе нанокристаллических и аморфных диссипативных структур».

- Разработана и изготовлена экспериментальная установка для соединения металлов, металлов с неметаллами и неметаллов с неметаллами через электрически взрывающиеся прослойки, на которой можно соединить узлы существующих и новых типов приборов.

- Материалы исследований внедрены в учебный процесс на кафедре «Электронное машиностроение и сварка» СГТУ в виде лекций и лабораторных работ по дисциплинам «Технология материалов и изделий электронной техники» и «Оборудование и технология сварки и пайки изделий электронной техники».

Апробация работы. Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на 5-й, 6-й, 7-й Всероссийских с международным участием научно-технических конференциях «Быстрозакаленные материалы и покрытия» и научно-технических семинарах «Диффузионная сварка и её роль в современной технике» (Москва, 2006 г., 2007 г., 2008 г.), на IV Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2008 г.), на IV Российской студенческой научно-технической конференции «Вакуумная техника и технология» (Казань, 2009), на научно-технической конференции «Электроника и вакуумная техника: приборы и устройства. Технология. Материалы» (Саратов, 2009), на Международной научно-технической конференции «Успехи современной электротехнологии» (Саратов, 2009), на XXII Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ-22 (Искон, 2009), на XVI научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (Сочи, 2009), на

Международной Российско-Казахстанско-Японской научной конференции (Волгоград, 2009).

Работа пользовалась в соответствии с грантом «Перколяционная модель электрического взрыва» финансовой поддержкой по программе У.М.Н.И.К. на 2009-2010 гг. и удостоена Почетной грамоты на Пятом Саратовском салоне изобретений и инноваций 2010 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ (в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ), 15 статей в научных сборниках (из них 2 без соавторов).

Личный вклад автора. Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, разработке методик и моделей исследований, модернизации оборудования и разработке технологий.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 60 наименований, приложения (расчет по перколяционной модели) и актов использования результатов в производстве. Работа изложена на 145 страницах, содержит 61 рисунок и 4 таблицы.

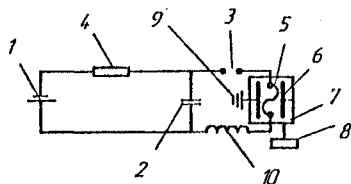
СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, приведены положения, раскрывающие новизну и практическую ценность, цель и задачи исследований.

В первой главе приведен обзор высокоинтенсивных методов для соединения металлов, металлов с неметаллами и неметаллов друг с другом в твердом состоянии: сварка взрывом, магнитоимпульсная, вакуумно-термическая магнитоимпульсная обработка, сварка импульсным разрядом в жидкости, ударная сварка в вакууме, ДСВ и соединение через электрически взрывающиеся прослой. На основе результатов анализа сделан вывод о том, что наиболее целесообразно использовать для изготовления узлов из неметаллических материалов прослой, получаемые путем электрического взрыва проводников.

В диссертации для электрического взрыва проводников предложено использовать схему колебательного контура с переменным сопротивлением (рис. 1).

Рис.1. Принципиальная электрическая схема для сварки с использованием электрического взрыва проводников: 1 - источник питания; 2 - высоковольтный импульсный конденсатор; 3 - замыкатель электрической цепи; 4 - зарядное сопротивление; 5 - взрывающийся проводник; 6 - свариваемые детали; 7 - вакуумная камера; 8 - откачная система; 9 - механизм давления; 10 - индуктивность



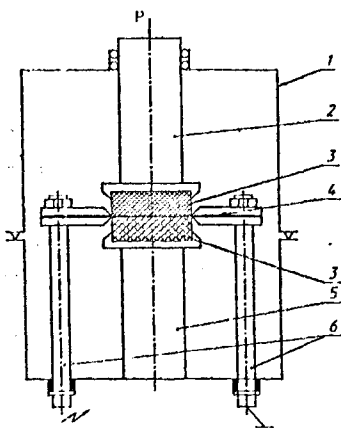


Рис. 2. Сварка с использованием СВЗПВ:
 1 - вакуумная камера; 2 - пуансон;
 3 - свариваемые изделия; 4 - металличе-
 ский проводник; 5 - рабочий стол;
 6 - электроды

Также отмечено, что для соединения узлов практически из любых металлов и сплавов, металлов с неметаллическими материалами и неметаллов друг с другом могут быть применены три основные схемы: соединяемые материалы контактируют друг с другом через взрывающиеся прослой (рис. 2); соединения металлов и металлов с неметаллами осуществляются через одновременно или последовательно взрывающиеся проводники; соединения неметаллов с неметаллами осуществляются через прослой (проводники) жидкого стекла.

Можно полагать, что электровзрыв прослой, сопровождаемый разлетом паров, электронов, ионов и золя, локально повышает температуру, очищает и активирует контактные поверхности на атомарном уровне.

Вторая и третья главы посвящены теоретическим исследованиям процесса взрыва прослоев и физических явлений при этом и расчету электрических параметров колебательного контура.

Приведена трехстадийная схема образования соединений: электрический взрыв проводника; взаимодействие с образованием химических связей; объемное взаимодействие между прослоем и соединяемыми материалами в контактной зоне.

Металлические прослой имеют зернистое строение. Электросопротивление границ зерен, мелкодисперсных фаз и других неоднородностей отличается от электрического сопротивления металла внутри зерен. Здесь оно значительно меньше, чем на границах зерен.

В диссертации предложена перколяционная модель протекания тока при электрическом взрыве прослоев из фольги, качественно подтвержденная экспериментальными результатами.

При этом плоский проводник представлен в виде сетки заданных сопротивлений со случайным разбросом номиналов сопротивлений (рис. 3а).

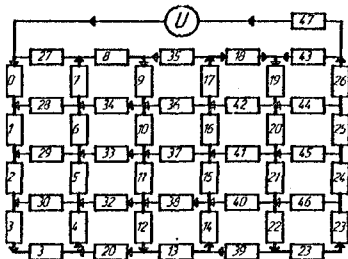


Рис. 3 а. Сетка со случайным разбросом сопротивлений:
 U – напряжение, приложенное к проводнику

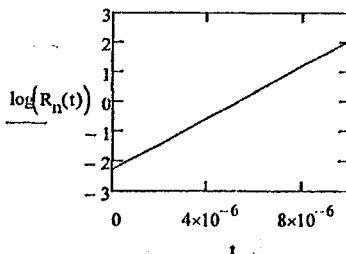


Рис. 3 б. Зависимость сопротивления никелевого прослой толщиной 20 мкм от времени в процессе взрыва

В предложенной качественной модели цепь рассчитывается матрично-топологическим методом по следующему алгоритму. Вначале задаются характеристики материала прослой в твердом и жидком состояниях (проводимость, плотность, удельная теплоемкость, температура плавления, температура кипения, температурные коэффициенты, коэффициент теплопроводности, молярные массы), начальная температура, напряжение, сопротивления элементов и размеры прослой. Далее на каждом шаге по времени рассчитываются в каждой ветви сетки токи, электрические мощности, температура, определяемая по уравнению баланса внутренней и электрической энергии. Если в ветви достигается температура испарения, принимается, что сопротивление перегорело. Перегоревшие сопротивления образуют кластеры, которые, объединяясь, образуют разрывной кластер, разрушающий прослой и прекращающий протекание тока. Зависимость сопротивления прослой от времени $R_n(t)$ использовалась для расчета параметров электрической цепи колебательного контура по уравнению (1). Эта зависимость аппроксимировалась экспоненциальной зависимостью $R_n(t) := R_{n0} \cdot \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right)$, где R_{n0} – начальное сопротивление, t_0 – характерное время (рис. 3 б).

Визуально кластеры определяются по пикам температур на поверхности проводника (рис. 4, 5). Температура ветвей для двух последовательных моментов времени показана на рис. 6 а,б. Отчетливо видны «пики» температуры на границах зерен.

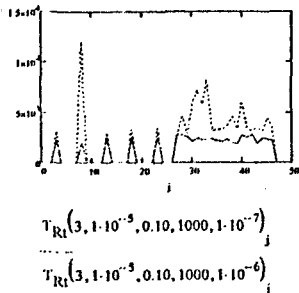


Рис. 4. Температура ветвей при $t = 10^{-7}$ с (1) и $t = 10^{-6}$ с (2). Титановая фольга толщиной 10^{-5} м, разброс начальных сопротивлений ветвей 10%, амплитуда напряжения 1000 В. j — номер ветви

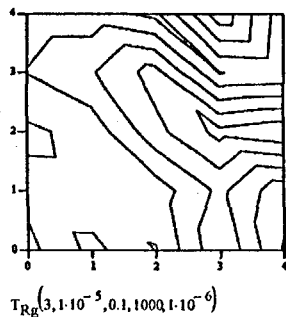
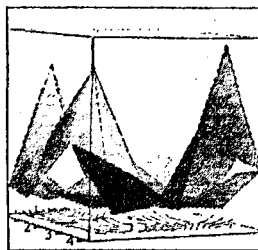
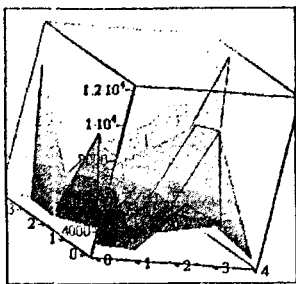


Рис. 5. Распределение температуры по поверхности прослая и линии уровня температуры при $t = 10^{-6}$ с

С увеличением размеров прослоев степень их разрушения уменьшается.



а)

б)

Рис. 6. Распределение температуры по площади проводника для двух последовательных моментов времени

Разработанная модель подтверждается экспериментальными результатами. На рис. 7 а, б, в показаны фрактограммы излома зоны соединения кварц + кварц, полученные после сварки через электрически взрываемую фольгу сплава 47НД толщиной 100, 50 и 30 мкм, площадью 10 см^2 . На

рис. 7 в отчетливо видны кластеры пустот (затемненные участки), подтверждающие полученные результаты, представленные на рис. 6. Видно, что при толщине пленки 100 мкм разрывной кластер не образуется, а при толщине 50 и 30 мкм образуется разветвленная сетка кластеров. При этом во втором случае образуется качественное соединение, в первом такое не образуется, а в третьем не имеет достаточную для узлов прочность.

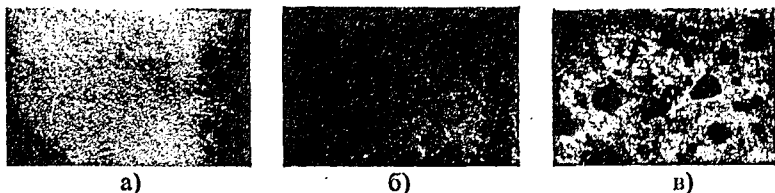


Рис. 7. Сетчатая структура в зоне соединения при электрическом взрыве проводника толщиной: а - 100 мкм; б - 50 мкм; в - 30 мкм

Согласно предложенной перколяционной модели и экспериментальным результатам представляется следующая физическая картина электрического взрыва проводника: так как электрическое сопротивление границ зерен значительно больше сопротивления в объеме, то плавление начинается с границы зерен, распространяется вглубь, образуя кластеры пустот, объединяющиеся в разрывной кластер. При этом сопротивление проводника растет, он разрушается и ток в цепи прекращается.

Для расчета электрических параметров колебательного контура, при которых происходит взрыв прослоя, использовано известное дифференциальное уравнение, в которое введено сопротивление $R_n(t)$:

$$\frac{d^2}{dt^2} V(t) + \frac{R_0 + R_n(t)}{L} \frac{d}{dt} V(t) + \frac{1}{L \cdot C} V(t) = 0, \quad (1)$$

где $R_n(t)$ - функция сопротивления проводника от времени t ; V - напряжение на конденсаторе; R_0 - сопротивление внешней цепи; C , L - емкость конденсаторов и индуктивность цепи разряда.

Величина $R_n(t)$ определяется по данным расчета перколяционной модели. В начальный момент времени задается напряжение на конденсаторе и нулевой ток в цепи.

На графиках (рис. 8) показаны зависимости тока в цепи разряда, напряжения на батарее конденсатора и на проводнике для конкретного момента времени. Они позволяют рассчитать параметры цепи для взрыва прослоя. Видно, что характерное время взрыва при заданных параметрах составляет порядка 10 мкс. Максимальный ток достигает значения 5000 А, а напряжение на проводнике - около 1000 В.

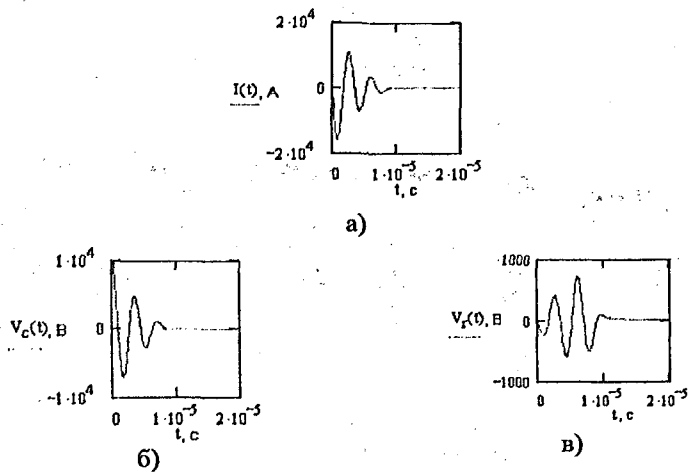


Рис. 8. Зависимость тока в цепи разряда (а), напряжения на батарее (б) и на проводнике (в) от времени разряда при $R_0 = 0,1$ Ом, $L = 3 \cdot 10^{-7}$ Гн, $C = 10^{-6}$ Ф и начальном сопротивлении проводника $0,01$ Ом ($W_n = 13,198$ Дж, $W_c = 50$ Дж)

Для определения механизма взаимодействия материалов впервые исследованы кристаллографические аспекты образования соединений разнородных материалов в твердом состоянии при невысоких температурах, когда гетеродиффузия или диффузия в зоне соединения не имеет ощутимого развития. По аналогии с ДСВ такое соединение можно классифицировать как соединение адгезионного типа. При этом первоначальная граница сохраняется и после соединения.

Установление общих связей между соединяемыми поверхностями возможно лишь при определенной подстройке одного материала к другому. Такая граница обладает минимальной межфазной энергией, термодинамически наиболее стабильна и обеспечивает высокую прочность соединений.

Исследования дифрактограмм металлической фольги после соединения представлены на рис. 10, а исходной фольги из материала 47НД – на рис. 9.

Исходная фольга ориентирована плоскостью (200) или, что то же самое, плоскостью (100) к плоскости прокатки, а переплавленная плёнка на поверхности ситалла – плоскостью (222) или, что то же самое, плоскостью (111) к поверхности подложки. Таким образом, плавление и кристаллиза-

ция привели к переориентации предпочтительных кристаллографических направлений в металлической прослойке.

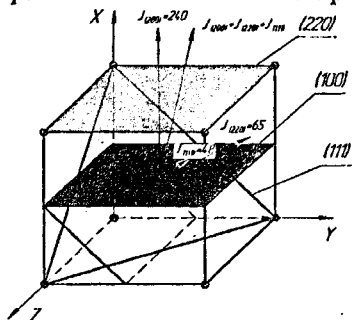


Рис. 9. Кристаллографическое состояние фольги (исходное состояние)

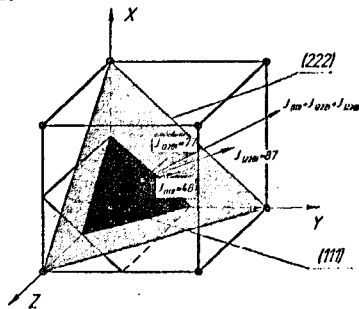


Рис. 10. Кристаллографическое состояние прослойки после воздействия СВЗПВ

В диссертации приведены схемы и конструкции металло- и феррито-металлических узлов электровакуумных, газоразрядных и ферритовых приборов.

При соединении разнородных материалов на прочность соединения отрицательное влияние оказывают внутренние напряжения в соединении.

Произведен расчет термоупругих напряжений, возникающих в соединении двух плоских деталей разнородных материалов, соединяемых через прослой для свободно опертой пластины.

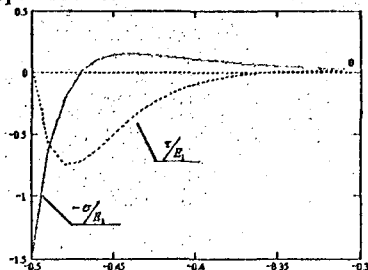


Рис. 11. Зависимость касательного и нормального напряжений вдоль оси OX от координат

На рис. 11 представлены напряжения $\tau(x)$ и $\sigma(x)$ вдоль оси OX. Обе кривые ясно показывают, что наибольшее напряжение сосредоточено вблизи края пластины. Нормальное напряжение сжатия достигает максимума на краю, а касательное напряжение — на расстоянии $0,3h$, где h — толщина прослой. Оба напряжения быстро убывают при удалении от кра-

св. Максимальные напряжения сосредоточены в узких зонах, ширина которых примерно равна толщине прослоя.

Прослой толщиной в диапазоне 20-80 мкм позволяют получать качественные соединения.

В четвертой главе описана экспериментальная установка для проведения исследований по сварке кварцевого стекла, ситалла, ферритов, вакуумно-плотных и пьезокерамик друг с другом через металлические прослойки из алюминия, титана, тантала, сплава 47 НД и макетов приборов с использованием эффекта взрывающихся прослоев (рис. 12).

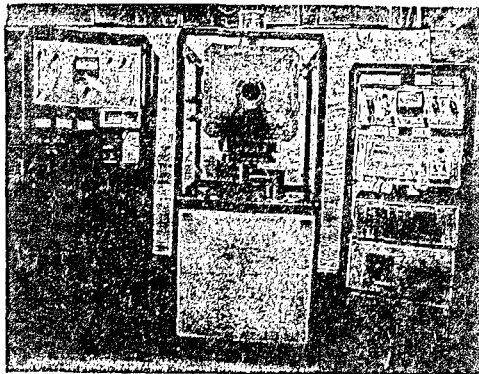


Рис. 12. Опытно-промышленная установка с использованием эффекта ЭВПВ

Описаны основные узлы и приведены их технические данные.

Для определения оптимальных режимов сварки применялись следующие методы исследований: фрактографический анализ разрушенных образцов; металлографические исследования на микроскопе МИМ-8; механические испытания на разрыв в разработанной оснастке на разрывной машине Р.5; рентгеноспектральные исследования на ДРОИ-3; исследования на вакуумную плотность на течеискателе ПТИ-10.

На рис. 13 приведены в качестве примера результаты металлографических исследований соединений ситалл-титан-ситалл, полученные при разрядных напряжениях 4,6,8 и 10 кВ. При этом на рис. 13 а наблюдается наличие пористости в середине металлической прослойки при напряжении разряда 4 кВ, а на рис. 13 б видно наличие несплошностей металла при напряжении разряда более 10 кВ. Эти факты указывают на вероятность получения неудовлетворительного качества соединения через титановую прослойку.

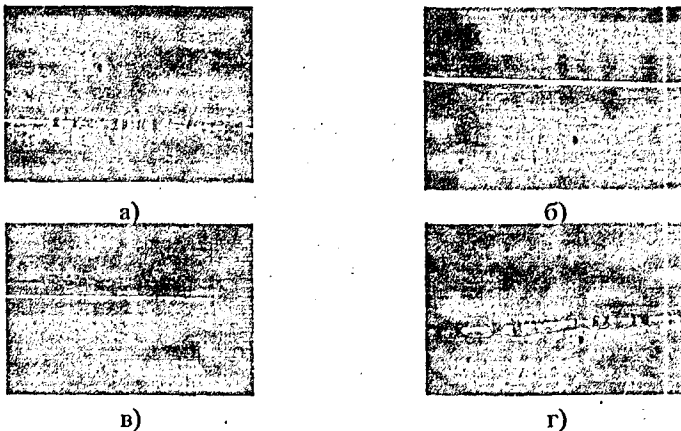


Рис. 13. Сварное соединение силалл-титан-силалл:

а - напряжение 4 кВ; б - напряжение 6 кВ; в - напряжение 8 кВ; г - напряжение 10 кВ

Замска материала прослойки на сплав 47 НД улучшает качество соединения, о чем свидетельствует отсутствие трещин на образцах силалла и феррита независимо от энергии разряда.

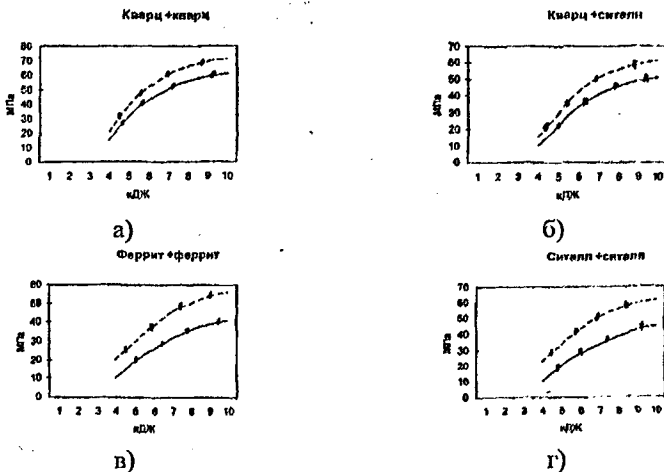


Рис. 14. Технологические режимы сварки следующих пар материалов:

а - кварц + кварц; б - кварц + силалл; в - силалл + силалл; г - феррит + феррит
 — титан, --- сплав 47 НД

Результаты механических испытаний прочности соединений на сдвиг, представленные на рис. 14, подтверждают этот вывод. Толщина прослой из титана – 15 мкм, из сплава 47НД – 50 мкм, усилие сжатия 10 МПа.

Таким образом, за оптимальные режимы соединения через электрически взрывааемые прослойки из сплава 47НД толщиной 50 мкм с размерами 10×10 мм могут быть приняты следующие параметры для указанных выше материалов: напряжение разряда 10 кВ, ток контура $I_{1,3} = 1,1$ МА, $I_2 = 1,5$ МА, усилия сжатия 10 МПа, температура предварительного нагрева в камере 673 К и вакуум 10^{-5} Па.

Ферриты 10 Сч-8 + медь МБ выдерживают термохимические нагрузки 2-й степени жесткости (рис. 15).

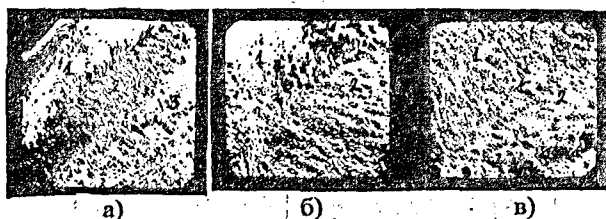


Рис. 15. Зона сварного соединения «феррит-10Сч-8 с медью МБ»: а - 1 - медь МБ, 2 - зона взаимодействия, 3 - феррит 10Сч-8 (увеличение - $100\times$); б - 1 - медь МБ, 2 - зона взаимодействия (увеличение - $300\times$); в - 1 - зона взаимодействия, 2 - феррит 10Сч-8 (увеличение - $500\times$)

В разработанной установке проведены эксперименты, по соединению рубин + рубин, нитридная керамика+нитридная керамика, феррит 40Сч-2 + керамика ВК94-2, по герметизации корпуса лазерного гироскопа из кварца и заглушки из ситалла. Эксперименты дали положительные результаты.

В пятой главе приведены результаты работы, принятые к внедрению на предприятии ОАО «НИП «Контакт» для изготовления металлокерамических узлов на основе алюмооксидной керамики для приборов: тиратронов газоразрядных импульсных типа ТГИ-1000, ТГИ-2000, ТГИ-5000; мощных генераторных ламп (МГЛ) типа ГУ-53, ГИ-64, ферритометаллических приборов СВЧ-диапазона, металлокерамических узлов ЗАО «Феррит-Квазар» для вентилях, циркуляторов и фазовращателей, антенно-фидерных устройств, они апробированы при герметизации корпуса лазерного гироскопа из кварцевого стекла заглушкой из ситалла. Описаны принципиальные схемы устройств, перспективных для изготовления изделий электронной техники, разработанные на кафедре ЭМС СГТУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

На основании исследований решена актуальная научная задача, заключающаяся в разработке технологий изготовления узлов электронных и газоразрядных приборов на основе соединения материалов через электрически взрываемые прослойки в вакууме при пониженных температурах и давлениях, обеспечивающих получение качественных соединений металлов, металлов с неметаллическими материалами и неметаллов с металлами, которые ранее не соединяли между собой.

1. Разработанные технологические основы соединения через электрически взрываемые в вакууме металлические и стеклянные прослойки на основе колебательного контура позволяют вводить энергию непосредственно в зону контакта и изготавливать узлы приборов из материалов, которые ранее не соединялись при уменьшенных до $300\div 400^\circ\text{C}$ температурах и давлениях $10\div 12$ МПа без применения драгметаллов.

2. Предложена кинетическая схема образования соединений с использованием электрического взрыва проводников с учетом трех стадий процесса и сложных физико-химических процессов на каждой из них.

3. Предложена методика расчета электрических параметров колебательного контура, оценивающая зависимость сопротивления проводника, тока в цепи разряда и напряжения на батарее конденсатора от времени, что позволяет с учетом сопротивления прослойки рассчитать электрические параметры цепи.

4. Предложенная перколяционная модель позволяет раскрыть физический механизм электрического взрыва проводника: плавление начинается с границ зерен, распространяется вглубь, образуя кластер пустот, при этом общее сопротивление проводника увеличивается и стремится к бесконечности с образованием разрыва прослойки.

5. Установлено, что плавление и последующая кристаллизация металлической прослойки приводят к кристаллографической подстройке кристаллической решетки металла к кристаллической решетке неметаллического материала, что на уровне наноразмеров, в свою очередь, приводит к формированию качественного соединения. Можно полагать, что термодинамически это приводит к большему выигрышу энергии.

6. Проведен расчет термоупругих напряжений, возникающих в соединении двух плоских деталей разнородных материалов, соединяемых через прослойку, показывающий, что наибольшие нормальные напряжения достигают максимума на краю, а касательные напряжения — на расстоянии $0,3h$ (толщина прослойки) от края прослойки.

7. Разработана и изготовлена специальная установка для соединения узлов приборов из металлов, металлов с неметаллами и неметаллов с металлами через электрически взрываемые прослойки в вакууме.

8. За оптимальные режимы соединения через электрически взрывае­мые прослой из сплава 47НД толщиной 50 мкм с размерами образцов 10×10 мм для указанных пар материалов могут быть приняты следующие параметры: напряжение разряда 10 кВ, усилия сжатия 10 МПа, температура предвари­тельного нагрева в камере 673 К и вакуум 10^{-5} Па. Соответствующая этим параметрам прочность составляет: ситалл+ситалл – 60 МПа, ситалл+кварц – 60 МПа, кварц+кварц – 70 МПа, феррит+феррит – 55 МПа.

9. Результаты работы приняты к внедрению в ОАО «НПП «Контакт» при изготовлении металлокерамических узлов, электронных приборов и в ЗАО «Феррит-Квazar» для ферритометаллических и ферритокерамических узлов приборов СВЧ-диапазона и апробированы при герметизации корпуса лазерного гироскопа.

Содержание диссертации изложено в следующих работах:

В изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. Коношков, В.Г. Перспективный метод соединения неметаллических материалов электронной техники / В.Г. Коношков, А.Н. Балакин // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – № 2. – С.143-147.

2. Коношков, В.Г. Нанотехнологии при соединении металлов с неметаллическими материалами через электрически взрывае­мые прослой / Р.А. Мусин, В.Г. Коношков, А.И. Балакин // Сварка и диагностика. – 2009. №2 (март-апрель). – С. 17-20.

В других изданиях:

3. Коношков, В.Г. Механизм формирования соединения при сварке с использованием ЭВП / О.Ю. Жевалев, В.Г. Коношков, И.А. Василькова, А.И. Балакин // Быстрозакаленные материалы и покрытия-2006: сб. тр. 5-й Всерос. с междунар. участием науч.-техн. конф. – М.: МАТИ 2006. – С. 29-31.

4. Коношков, В.Г. Нанотехнологии при сварке через электрически взрывае­мые прослой в вакууме / В.Г. Коношков, А.Л. Копскин, И.Ю. Соколова // Труды Междунар. Российско-Казахстанско-Японской науч. конф. – М.: МГМУ, 2009. – С. 349-354.

5. Коношков, В.Г. Принципы разработки технологии и оборудо­вания для сварки через взрывающиеся прослой / В.Г. Коношков, А.И. Балакин, И.А. Василькова // Быстрозакаленные материалы и покрытия: сб. тр. 6-й Всерос. с междунар. участием науч.-техн. конф. – М.: МАТИ - РГТУ им. К.Э. Циолковского, 2007. – С.233-237.

6. Коношков, В.Г. Технологические особенности сварки диэлек­триков с использованием взрывающихся проводников / А.Я. Зоркин, В.Г. Коношков, С.И. Павлов // Тонкопленочные покрытия: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. Томск: Изд-во ТГУ, 2008. – С.243-244.

7. Конюшков, В.Г. Модель процессов соединения диэлектриков способом взрывающихся проводников / А.Я. Зоркин, О.Ю. Жевалев, В.Г. Конюшков // Быстрозакаленные материалы и покрытия: сб. тр. 7-й Всерос. с междунар. участием науч.-техн. конф.– М.: МАТИ - РГТУ им. К.Э.Циолковского, 2007. – С.390-394.
8. Конюшков, В.Г. Напряженно-деформированное состояние в сварных соединениях, полученных способом взрывающихся проводников / А.Я. Зоркин, В.Г. Конюшков, С.П. Павлов // Современные проблемы машиностроения: тр. IV Междунар. науч.-техн. конф.– Томск: Изд-во ТГУ, 2008. – С.340-342.
9. Конюшков, В.Г. Кристаллографические аспекты образования соединений разнородных материалов в твердой фазе /Р.А.Мусин, Г.В. Конюшков, В.Г. Конюшков // Современные проблемы машиностроения: тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Томск: Изд-во ТГУ, 2008. – С.418-422.
10. Конюшков, В.Г. Нанотехнологические основы сварки через электрически взрывающиеся проводники в вакууме / В.Г. Конюшков, А.А. Копенкин, И.Ю. Соколова // Вакуумная техника и технология: материалы IV Рос. студ. науч.-техн. конф. Казань; Изд-во КГТУ, 2009. – С. 147-148.
11. Конюшков, В.Г. Влияние термомеханических характеристик припоя на термоупругие напряжения трехслойных пластин / А.Я. Зоркин, В.Г. Конюшков, С.П.Павлов, М.В. Жигалов // Электроника и вакуумная техника: приборы и устройства. Технология. Материалы: материалы науч.-техн. конф. - Саратов: СГТУ, 2009. – С. 74-78.
12. Конюшков, В.Г. Нанотехнологии при соединении металлов с неметаллическими материалами через электрически взрывающиеся прослой / Р.А. Мусин, В.Г. Конюшков // Электроника и вакуумная техника: приборы и устройства. Технология. Материалы: материалы науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2009. – С. 161-165.
13. Конюшков, В.Г. Перколяционная модель электрического взрыва проводников в вакууме / В.Г. Конюшков, А.Я. Зоркин // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XXII Междунар. науч. конф. ММТТ-22: в 10 т. – Псков: Изд-во ПГТУ, 2009. Т.8. – С. 160-162.
14. Конюшков, В.Г. Нанотехнологии при сварке через электрически взрывающиеся прослой в вакууме / В.Г. Конюшков, А.А. Копенкин, И.Ю.Соколова // Вакуумная наука и техника: материалы XVI науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов. - М.: МИЭМ, 2009. – С. 44-47.
15. Конюшков, В.Г. Перколяционная модель электрического взрыва проводников в вакууме / В.Г. Конюшков // Вакуумная наука и техника: материалы XVI науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов - М.: МИЭМ, 2009. – С. 47-51.

10 - 14858

20104
74858

16. Конюшков, В.Г. Нанотехнологии при сварке через электрически взрываемые прослойки в вакууме / В.Г. Конюшков // Успехи современной электротехнологии: тр. Междунар. науч.-техн. конф. - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2009. - С. 211-214.

17. Конюшков, В.Г. Модель нанотехнологии соединения материалов способом электрического взрыва проводников / А.Я. Зоркин, В.Г. Конюшков // тр. Междунар. Российско-Казахстанско-Японской науч. конф. - М.: МГМУ, 2009. - С. 338-343.

КОНЮШКОВ Владимир Геннадьевич

**СОЕДИНЕНИЕ УЗЛОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ МЕТОДОМ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОСЛОЕВ В ВАКУУМЕ**

Автореферат
Корректор О.А. Панина

Подписано в печать 08.04.10

Формат 60x84 1/16

Бум. офсет.

Усл. печ. л 1,0

Уч.-изд. л. 1,0

Тираж 100 экз.

Заказ 93

Бесплатно

Саратовский государственный технический университет

410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Отпечатано в Издательстве СГТУ. 410054, Саратов, Политехническая ул., 77