

Глава 7. ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ МИКРОЧАСТИЦ НА МАТЕРИАЛЫ

Овчинников В.И., Ильющенко А.Ф., Судник Л.В.

*Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии»
г. Минск, Беларусь, E-mail: impuls@bn.by*

Введение

Соударения потоков микрочастиц с металлическими модулями космических аппаратов долгое время рассматривались с позиции эрозии внешней поверхности. Однако по мере накопления информации стало очевидно, что такой подход не соответствует реально протекающим процессам и требует детального изучения. Поэтому при разработке космических аппаратов (КА) с длительным сроком работы в космосе, одной из проблем, стоящих перед разработчиками, является защита КА от воздействия потоков микрочастиц, электромагнитного и ионизирующего излучения. Особенно это актуально для элементов микроэлектроники, применяемых в системах управления КА.

Однако, в настоящее время имеются лишь отдельные экспериментальные исследования, посвященные изучению влияния воздействия высокоскоростных потоков микрочастиц на микроструктуру и физико-механические свойства материалов. Практически отсутствуют публикации и сообщения о влиянии соударения потоков микрочастиц (сгустков космической пыли) и возникающих при этом импульсов электромагнитного излучения (ЭМИ) на структуру и свойства многослойных материалов (ММ), деградацию элементов микроэлектроники и интегральных микросхем (ИМС), применяемых в КА, а также предложения по созданию средств их защиты. Поэтому исследования, направленные на решение данной проблемы, имеют важное теоретическое и практическое значение.

1. Аналогии взаимодействия потоков частиц с КА в космосе и земных условиях

В данном разделе представлены некоторые результаты моделирования взаимодействия высокоскоростных потоков микрочастиц с преградой, имитирующей соударение микрочастиц космической пыли с космическими аппаратами, а также экспериментальные результаты исследований воздействия потоков микрочастиц и сопутствующих поражающих факторов на изменения в материалах, в том числе и деградацию элементов микроэлектроники.

Определение причин отказов систем управления и навигации космических аппаратов (КА), наблюдавшихся в ходе длительных полетов, представляет собой весьма актуальную задачу. Выход из строя систем управления в ходе длительных полетов существенно снижает надежность и соответственно повышает затраты в этой области. В частности, это требует дополнительного дублирования спутников-ретрансляторов, ведет к увеличению количества запусков КА. В настоящее время экспертами активно разрабатывается гипотеза, что одной из вероятных причин отказов электронных систем КА являются потоки космических пылевых частиц и высокоэнергетических (галактических) ионов, движущиеся в околоземном и межпланетном пространстве и имеющие скорости от 1 до 80 км/с и более [1]. Космическая пыль образуется частицами размером от нескольких до 1000 мкм (рис.1). Основная масса микрочастиц космической пыли (до 80 %) имеет размер от 1 до 100 мкм [1,2].

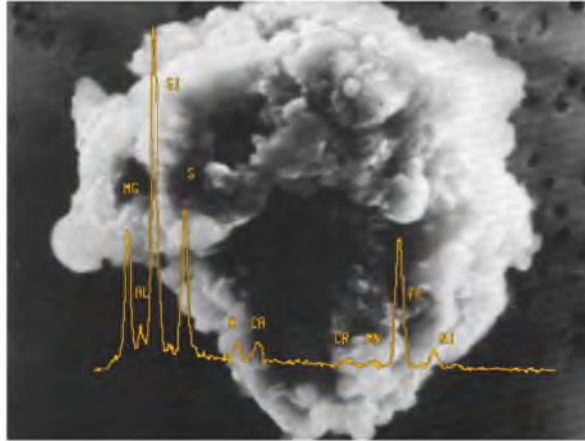
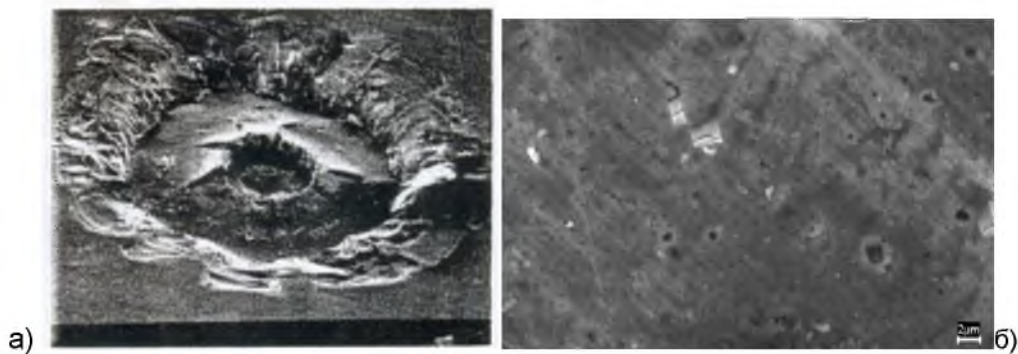


Рисунок 1 – Частица космической пыли и ее состав

При бомбардировке внешней поверхности искусственных спутников земли (ИСЗ) потоками микрочастиц космической пыли имеют место три типа взаимодействия:

- проникновение частиц в материал;
- выброс из зоны удара облака испаренных материалов и осколков;
- эмиссия ударной плазмы, представляющая потенциальную опасность для последующего возникновения электрического разряда между заряженными элементами ИСЗ [3].

Например, анализ состояния солнечных батарей (СБ) космической станции «Мир», космического телескопа Хаббл (США) и других космических аппаратов показал, что слоистые структуры СБ чувствительны к потокам космической пыли [4]. На поверхности СБ образуется кратер (рис.2,а), выброс плазмы и пара, в слоистой структуре батареи распространяется ударная волна. Микрорентгенспектральным анализом установлен элементный состав частиц космической пыли Si, Fe, C, S (рис.1), что позволило определить выбор микрочастиц для проведения лабораторных экспериментов. Доказано существование некоторой области взаимодействия микрочастиц с КА, так называемого сверхглубокого проникания (SDP), в рамках которого эффективность пробивания микрочастицами металлов на много порядков выше, чем у макротел [5]. В связи с этим актуальным является моделирование и исследование влияния и возможных повреждений конструкций ударами микрочастиц размером <math><100\text{ мкм}</math> с относительно низкими скоростями порядка 1-5 км/с, которые соответствуют скоростям соударения КА с микрочастицами космической пыли (МЧКП) [6].



а)

а) микрократер на солнечной батарее космического телескопа Хаббл

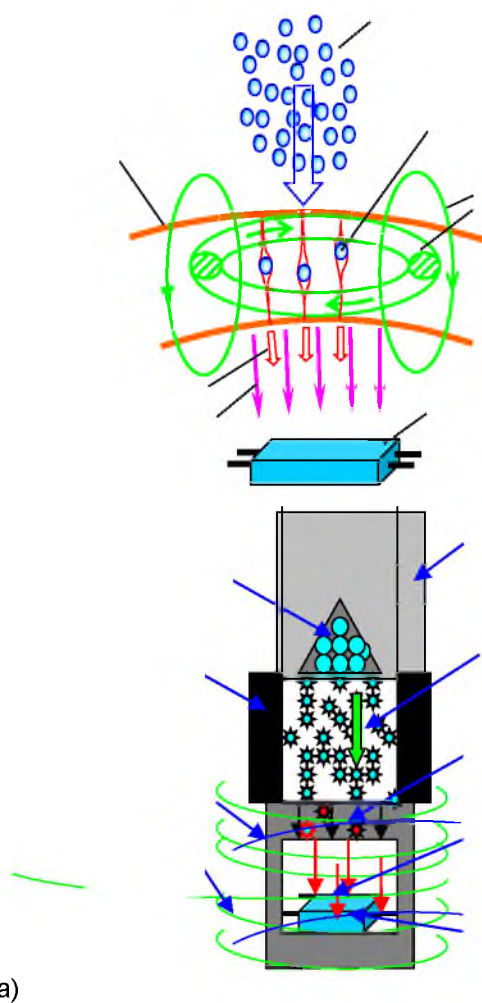
б) Микрократеры на модельном образце из алюминия, полученные в лабораторных условиях

Рисунок 2 – Микрократеры, образовавшиеся на поверхности преграды после воздействия потоком микрочастиц

Существующую проблему можно решить, создавая модели процессов соударения сгустков космической пыли с КА (рис.3) и изучая воспроизводимые при этом явления и возможные последствия выхода из строя электронных систем управления в земных условиях. Задача состоит в создании ускорителя имитирующего

взаимодействие потоков частиц космической пыли и «галактических» ионов с КА, схем эквивалентных взаимодействию потоков заряженных частиц с преградой, методик и приборов регистрации поражающих факторов. Разработка новых методик моделирования процесса высокоэнергетического взаимодействия потоков вещества, факторов их влияния на изменение тонкой структуры микросхем позволяет проводить тестирование, оценивать надежность и работоспособность микросхем в экстремальных условиях.

Соударение высокоскоростных потоков частиц с преградой сопровождается ударно-волновым процессом, высоким давлением, прониканием частиц, электромагнитным импульсом и ионизирующим излучением, т.е. комплексом эффектов. Определить влияние каждого из них или в комплексе на изменение выходных параметров микросхем является достаточно сложной задачей и требует как теоретических, так и экспериментальных исследований.



а) – соударение частиц космической пыли с КА; б) – соударение частиц в лабораторном эксперименте

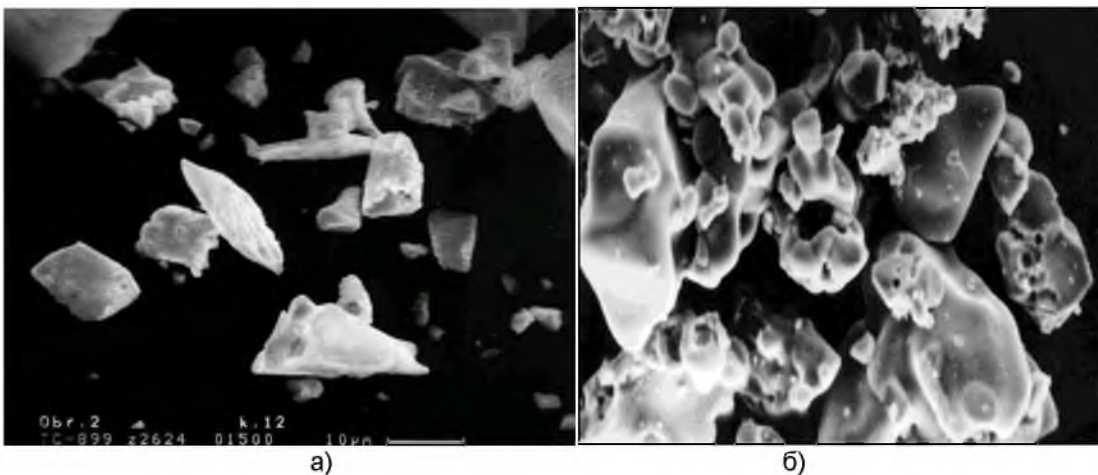
Рисунок 3 – Схемы аналогии взаимодействия потоков частиц с КА и преградой в лабораторных условиях

При моделировании процесса взаимодействия высокоскоростных потоков частиц космической пыли с КА в лабораторных экспериментах применяли общую схему с изменениями и дополнениями в зависимости от поставленных задач.

В качестве материала контейнера (преграды) использовали сталь-40 и алюминий. В качестве тестовых объектов для определения влияния высокоскоростных потоков и проникающих частиц на изменение электрофизических параметров, служили конкретные интегральные микросхемы производства ОАО «Интеграл» и образцы из

алюминия. В экспериментах использовали микросхемы в металлическом корпусе двух видов: интегральные логические микросхемы, и специализированные (для космических применений) микросхемы (АС10). Последний вариант микросхемы предназначен для работы на борту летательных аппаратов. Динамическую обработку осуществляли при следующих стандартных параметрах: фоновое давление составляло порядка 10 ГПа, средняя скорость частиц – 800-1500 м/с, время воздействия ~50 мкс. В качестве материала микрочастиц применяли порошок SiC с размером частиц 63-70 мкм. Энергоносителем служило взрывчатое вещество – аммонит 6ЖВ, количество взрывчатого вещества 200 грамм на один эксперимент. Для исследования процессов взаимодействия сгустка частиц с преградой использовали порошки SiC и Al₂O₃ фракций 50-100 мкм (рис.4,а,б). Преградой служили образцы цилиндрической формы диаметром 10-50 мм и высотой 30-100 мм, изготовленные из конструкционных сталей и алюминия. Исследование зависимости изменений индукции магнитного поля проводилось с помощью разработанной методики и аппаратуры (РЭМИ-01). Напряженность электромагнитного поля измерялась трехкоординатным датчиком Холла, установленным на расстоянии 10-15 см от эпицентра взрыва.

Сигнал передавался через систему усиления на аналоговоцифровые преобразователи и выводился на экран дисплея компьютера. По результатам измерений проводились расчеты индукции магнитного поля. Более подробно методики и результаты исследований изложены ниже.



а) частицы SiC; б) частицы Al₂O₃

Рисунок 4 – Микрочастицы для проведения эксперимента

2. Методика и методы исследований

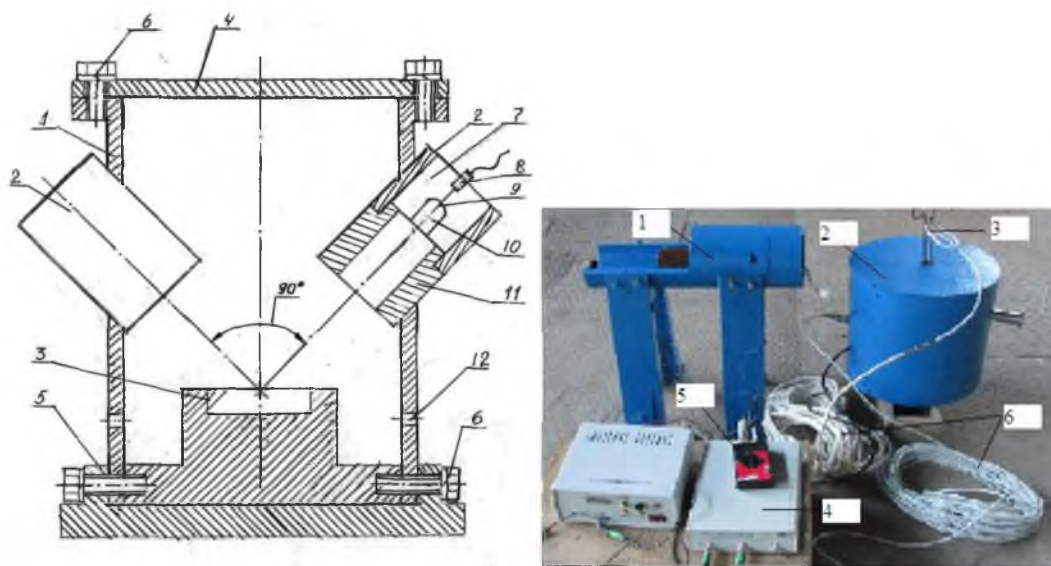
2.1 Ускоритель и схема для испытаний материалов потоком высокоскоростных микрочастиц

Ускорители с применением взрывчатых веществ (ВВ) отличаются простотой конструкции и дешевизной [7] и нашли широкое применение в практике. При их использовании поток микрочастиц формируется при обжатии зарядом ВВ контейнера с частицами порошка. При использовании в качестве контейнера полых цилиндров из бериллия удалось достичь скоростей струи до 90 км/с [8].

Принцип действия разработанных ускорителей основан на необходимости создания физических условий для разгона частиц до скоростей порядка 1-3 км/с. Для осуществления таких скоростей метания тел используется кумуляция энергии взрыва и воздействие ударных волн от зарядов взрывчатых веществ (ВВ).

Используемое ВВ характеризуется различными параметрами. В разработанной схеме кумулятивного разгона частиц в качестве взрывчатого вещества использован насыпной аммонит 6ЖВ. При метании с использованием энергии взрыва заряда ВВ, часть энергии переходит в кинетическую энергию порошка, обеспечивая необходимую скорость потока частиц.

Исследовательские работы последних лет позволили создать ряд установок (рис.5), имитирующих условия взаимодействия потоков микрочастиц с КА и приборы для регистрации ЭМИ, сопровождающего процесс.



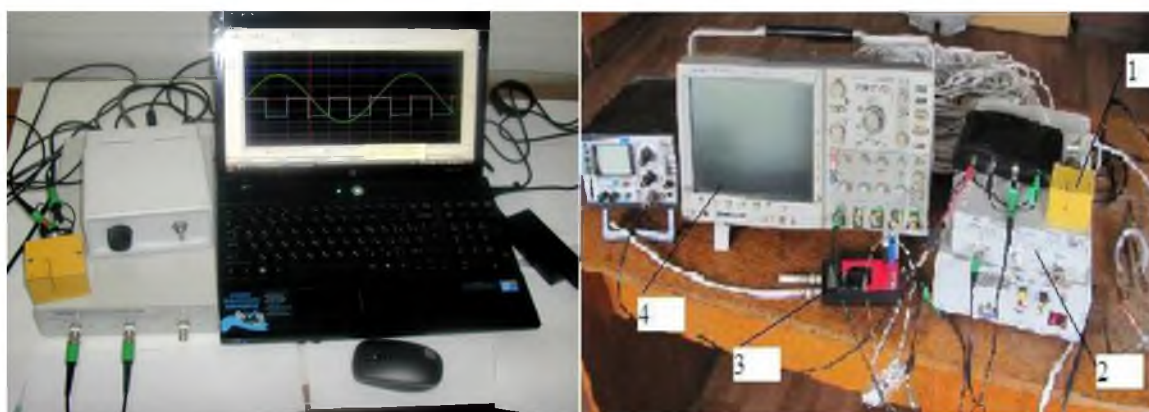
а) устройство для разгона микрочастиц с двумя ускорителями: 1 – камера; 2 – взрывные ускорители; болты крепления крышки; 3 – предметный стол; 4 – крышка камеры; 5 – днище камеры; 6 – элементы крепления; 7 – взрывчатое вещество; 8 – детонатор; 9 – кумулятивная воронка; 10 – микрочастицы; 11 – регулирующая опора; 12 – отверстие для выхода газообразных продуктов взрыва

б) установка для разгона микрочастиц с одним ускорителем и камерой для испытаний: 1 – кумулятивный ускоритель; 2 – камера для образцов; 3 – антенна; 4 – АЦП; 5 – прибор измерения ЭМИ; 6 – соединительные кабели

Рисунок 5 – Устройства для разгона микрочастиц

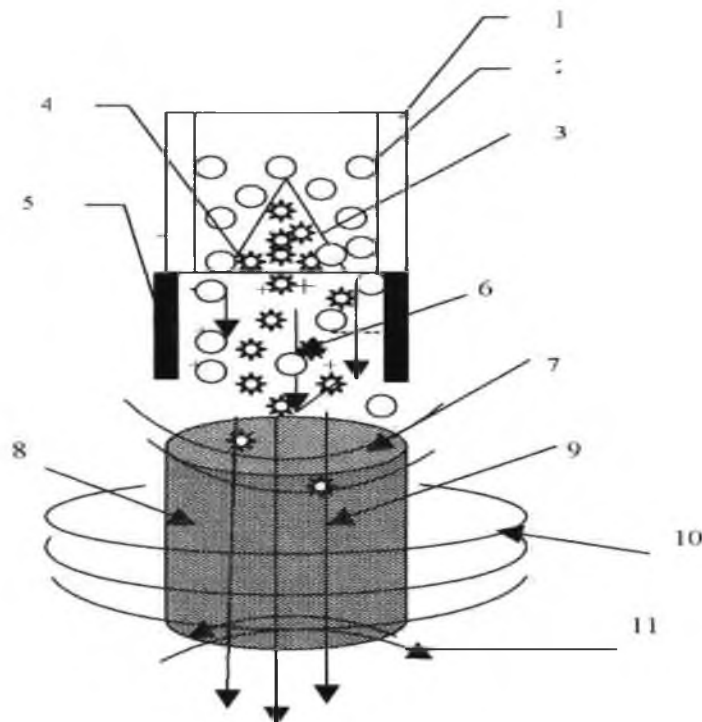
2.2 Анализ процессов магнитодинамического взаимодействия высокоскоростных потоков микрочастиц с металлической преградой

Эксперименты по изучению взаимодействия высокоскоростных ПМЧ с материалами и исследование зависимости изменений индукции МП проводили по специальной схеме с применением приборов приведенных на рисунке 6.



1 – датчик Холла; 2 – АЦП; 3 – прибор измерения ВЧ ЭМИ; 4 – ВЧ осциллограф;
Рисунок 6 – Приборы регистрации электромагнитного излучения

В результате взаимодействия потока микрочастиц и их проникания в образец в виде цилиндра из стали 10, последний намагничивается, вокруг него формируется МП (рис.7) величина которого зависит от структуры, магнитных свойств материала и ионизации потока частиц.



1 – корпус заряда; 2 – взрывчатое вещество (ВВ); 3 – кумулятивная воронка;
4 – частицы порошка; 5 – регулирующая опора; 6 – поток ионизированных частиц порошка и плазмы; 7 – ударная волна; 8 – металлический образец; 9 – силовые линии электрического поля, E; 10 – силовые линии магнитного поля; 11 – отраженная волна

Рисунок 7 – Схема формирования электромагнитного поля при воздействии потока микрочастиц SiC на преграду

2.2.1 Исследование электромагнитного излучения

Регистрацию магнитного поля, как одной из составляющих электромагнитного излучения, осуществляли с помощью регистрирующих ЭМИ приборов и трехкоординатного датчика Холла по разработанной методике.

В результате измерений были зарегистрированы спектры электромагнитного излучения амплитудой 0,1-1,5 В при длительности импульса $(5-12) \cdot 10^{-6}$ с на расстоянии 0,15 м от эпицентра взрыва. На рисунке 8 представлен один из результатов измерений импульса ЭМИ, полученных при проведении экспериментов высокоскоростного соударения потока микрочастиц SiC преградой. Составляющие вектора индукции магнитного поля B определяли из измерений э.д.с. датчиков Холла по каждому каналу, и рассчитывали по формулам расчета индукции магнитного поля. По результатам измерений рассчитывали среднее значение вектора индукции магнитного поля B_{cp} . Если в момент времени t на экране монитора э.д.с. по каналам X, Y, Z равны U_x, U_y, U_z соответственно в [мВ] то, соответствующие составляющие вектора магнитной индукции определяются в [мТл] по формулам. Относительная погрешность измерения не превышала $\pm 5\%$. Измеренное значение индукции магнитного поля, проведенное с помощью прибора РЭМИ-01, в зависимости от технологических параметров изменялось от 5 мТл до 80 мТл.

Среднее значение магнитной индукции, полученное по результатам измерений, $B_{cp}=45,9$ мТл. Теоретические расчеты магнитной индукции по представленной модели $B_{cp}=49,5$ мТл, что на 7-8 % выше значений измеренных, это объясняется как погрешностью измерений, так и тем, что измерения проводили на расстоянии 10-15 см от точки взаимодействия потока микрочастиц с преградой.

В момент взрыва продукты сдетонировавших взрывчатых веществ представляют собой смесь газообразных и конденсированных веществ при давлении 20-40 ГПа и температуре 3000-5000 К. Подобные состояния типичны для низкотемпературной неидеальной многокомпонентной и многофазной плазмы с малой концентрацией заряженных частиц, которые также участвуют в процессе формирования потока частиц

Установлена зависимость индукции магнитного поля от изменения энергии потока микрочастиц обусловленной массой заряда ускорителя. На рисунке 9 представлено влияние энергии потока микрочастиц на изменение индукции магнитного поля. Экспериментальные исследования показали, что значение индукции магнитного поля увеличивается с увеличением энергии потока микрочастиц.

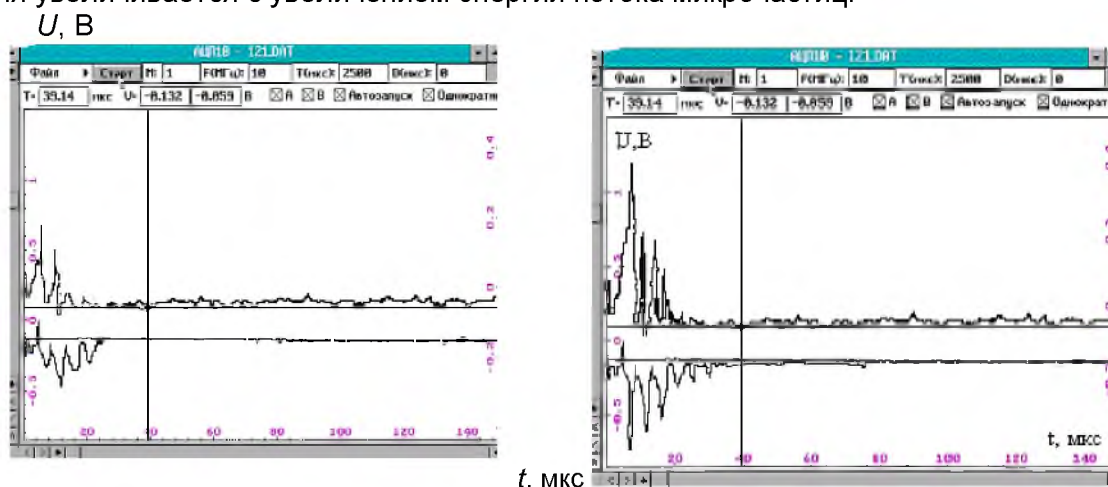


Рисунок 8 – Вид дисплея компьютера с зарегистрированными сигналами, возникающими при воздействии потоком микрочастиц SiC на сталь 40

Это связано с тем, что большие градиенты скоростей потока за фронтом ударной волны в конденсированных ВВ могут приводить к распределению электрических зарядов в детонационной плазме, что необходимо учитывать при эксперименте. Распределение электрических зарядов вызывает распределение электрического поля и потенциала.

Известно, что в неидеальной плазме взрыва при введении в нее частиц порошка за счет распределения зарядов на поверхности частиц образуются магнитные диполи. Движение диполей в электрическом поле приводит к созданию магнитного поля. Магнитное поле оказывает существенное влияние на формирование потока ускоренных взрывом частиц. В магнитном поле поверхность потока стабилизируется и его изменение в результате наличия градиента скорости осуществляется равномерно вдоль оси. Дополнительное введение частиц порошка различного размера приводит к изменению индукции магнитного поля и оказывает влияние на процесс кумуляции. Проведены измерения индукции магнитного поля при введении в поток кумулятивной струи частиц с размером от 20 до 200 мкм. Результаты измерений приведены на рисунке 10. График зависимости магнитной индукции от размера частиц порошка вводимого в поток неидеальной плазмы взрыва не является линейной функцией. Зависимость интенсивности электромагнитного излучения от размеров частиц увеличивается до максимального значения с изменением размера частиц от 20 до 100 мкм и резко уменьшается с увеличением размера от 150 до 300 мкм. С увеличением размеров частиц свыше 150 мкм резко увеличивается неидеальность плазмы за счет увеличения числа нейтралов и снижения электрического потенциала плазмы.

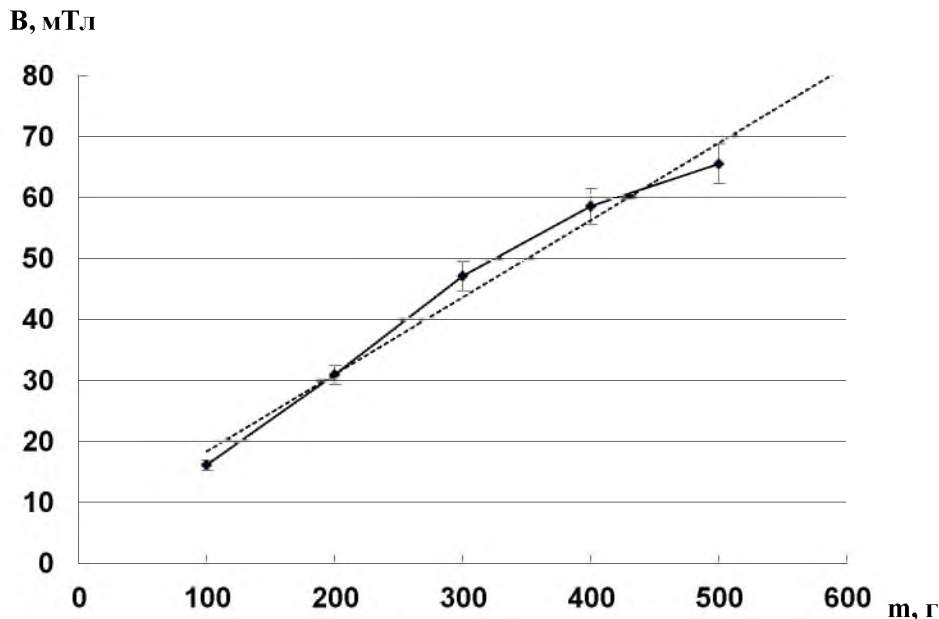


Рисунок 9 – Зависимость индукции магнитного поля от энергии ПМЧ (массы заряда ВВ)

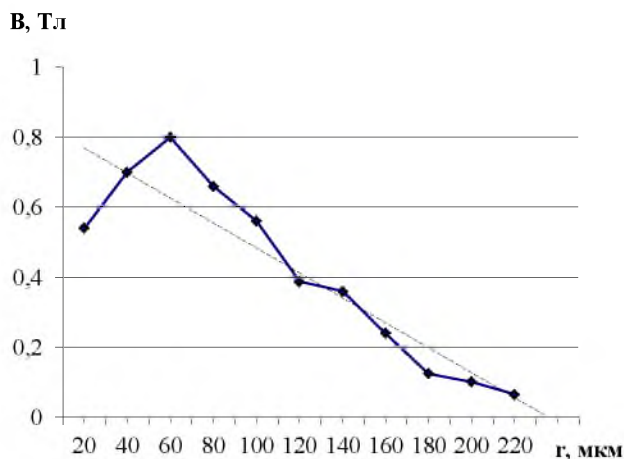
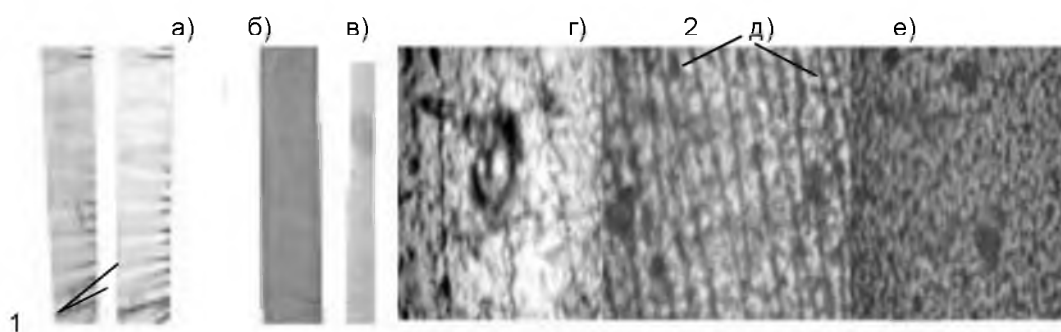


Рисунок 10 – Изменение магнитной индукции от размера вводимых частиц

2.2.2 Исследование ионизирующего излучения, возникающего при соударении высокоскоростных потоков микрочастиц с металлической преградой

Исследование ионизирующего излучения, проведено по специальной методике. На фотодетекторах, располагавшихся в щели вдоль направления потока частиц, получены засветки в виде чередующихся полос шириной 2-6 мм (рис.11,а,б). Анализ структуры засветок измерение их размерностей производили с полученных негативов на оптическом микроскопе «Leika» при увеличениях от 50х до 1000х. Определение интенсивности засветок и обработку полученных результатов производили по компьютерной программе «Профиль 1,0».

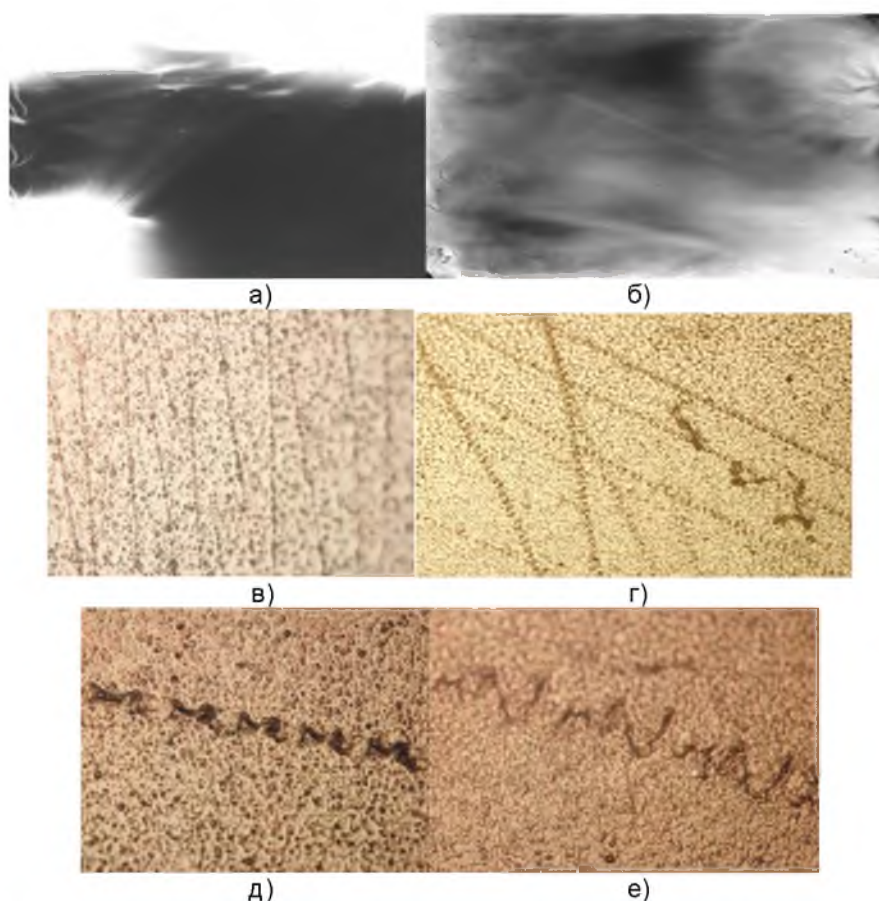
Для оценки интенсивности засветки производили калибровку рентгеновской пленки засветкой на аппарате ДРОН-3 при режиме $U=23$ кв, $J=3,5$ ма. U - ускоряющее напряжение, J -ток. Время засветки $t=1$ с. С учетом времени процесса 100 мкс, энергия излучения на засветку одной зоны составляет $(0,5-1,2) \cdot 10^{-2}$ Дж. Установлено, что структура линий засветки (треки) обладает признаками, характерными для траектории движения элементарных заряженных частиц в магнитном поле. Длина треков составляла $(10-15) \cdot 10^{-3}$ м, ширина одного трека $(2-4) \cdot 10^{-6}$ м, плотность треков составляла ~ 300 мм⁻².



1-полосы засветки; а) трехкратная обработка; б) однократная; в) эталон; 2-треки; г)500х; д)300х; е) структура пленки вне зоны засветки, 300х.

Рисунок 11 – Пленка, засвеченная при воздействии микрочастиц SiC на стальную преграду в радиальном направлении

Установлено, что форма треков в эмульсиях различна, особенно это характерно для фотопленок, расположенных вдоль боковой поверхности цилиндрического образца. Это и непрерывные прямые треки и длинные треки сложной формы, напоминающие спирали или в форме меандра. На рисунке 12 представлены фотопленки, располагавшиеся вдоль боковой поверхности образцов цилиндрической формы: а) вокруг образца из алюминия, б) вокруг образца из стали.



а), в), д) – вокруг образца из алюминия; б), г), е) вокруг образца из стали
а, б) x1; в) x200; г) x400; д) x500; е) x600

Рисунок 12 – Засветка фотодетекторов и виды треков, полученные в результате воздействия потока микрочастиц SiC на образцы из Al и стали

Более подробное изучение засветок под микроскопом с увеличением в 200-600 раз представлено на рисунках 12 в-е. На рисунках 12 д-е представлен типичный вид треков, напоминающий форму меандра. На рисунке 12е, представлен увеличенный фрагмент трека, из которого хорошо видно, что трек имеет сложный узор. Учитывая

место расположения фотодетектора за защитной преградой, размер трека и форму невозможно объяснить его происхождение регистрацией α -, β -, γ - излучения (напомним, что рентгеновская пленка завернута в несколько слоев черной бумаги). Детектирование треков на пленках позволяет утверждать, что траектория движения источника, вызывающего почернение, находится в плоскости фотоэмульсии, так как вид трека по всей его длине не изменяется. Оценка энергии частицы по длине пробега в фотоэмульсии дает величину $E \geq 80-100$ МэВ.

Аналогичные дефекты и треки наблюдаются на поверхности полупроводниковых пластин кремния, которые располагаются в тех же местах взамен фотодетекторов (рис. 13).

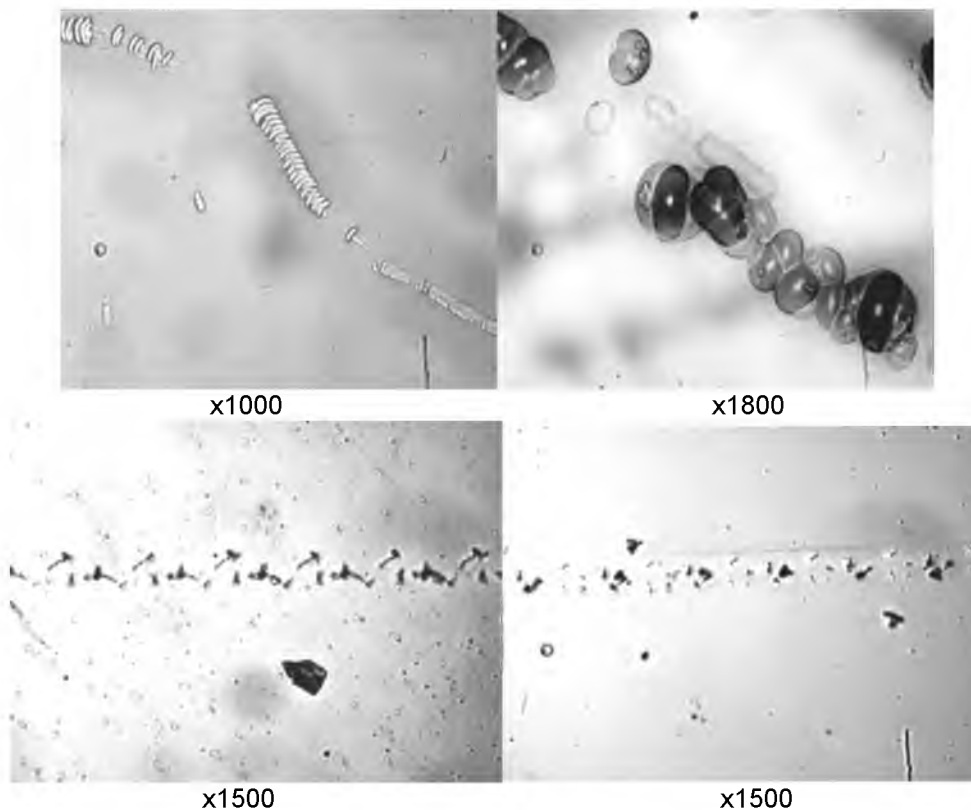
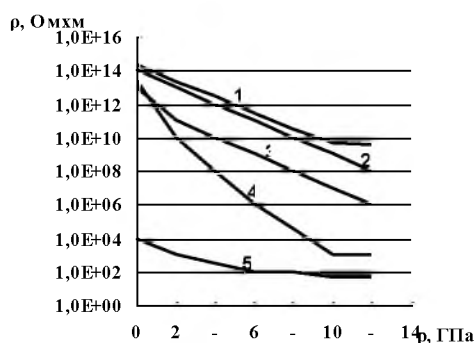


Рисунок 13 – Дефекты в пластине Si после воздействия высокоскоростным потоком микрочастиц SiC

Полированные монокристаллические пластины Si подвергали воздействию высокоскоростного потока микрочастиц SiC при скоростях разгона 1200–1500 м/с. После обработки часть пластин исследовалась в оптическом микроскопе при увеличениях от 500х до 1800х без предварительной подготовки (рис.13,а,б,г), поверхность части пластин промывалась этиловым спиртом. На поверхности видны следы некачественной промывки (рис. 13,в).

При высоких давлениях на фронте ударных волн у диэлектрических и полупроводниковых материалов резко снижается их удельное электрическое сопротивление. Это может приводить к короткому замыканию и выходу из строя полупроводниковых приборов. Проведены исследования влияния ударных волн на изменение удельного электрического сопротивления ряда материалов применяемых для изготовления элементов и корпусов микросхем. На рисунке 14 представлены результаты влияния давления ударных волн на изменение удельного электрического сопротивления однослойных и многослойных материалов. Установлено, что при повышении давления ударной волны меньше всего снижается удельное электрическое сопротивление у четырехслойной композиции.



- 1 –четырёхслойный композиционный материал; 2 – образец из SiO₂; 3 – образец из Al₂O₃;
 2 4 – образец из пластмассы; 5 – образец из фуллерена C₆₀

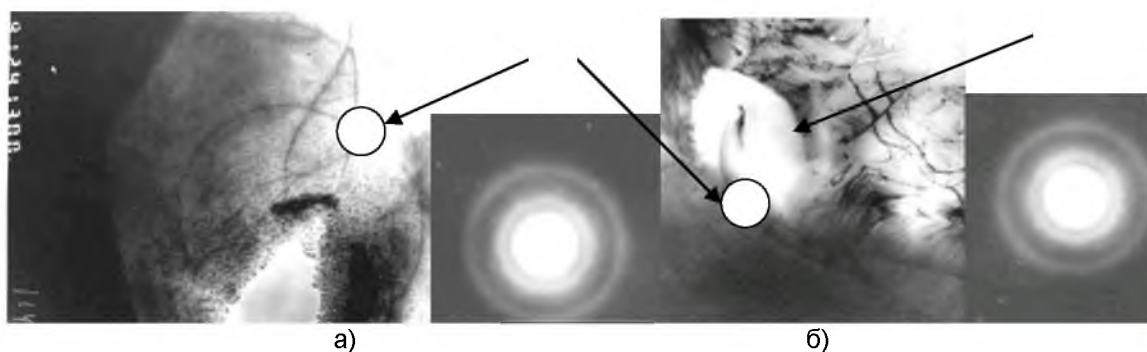
Рисунок 14 – Зависимость удельного электросопротивления материалов от давления, создаваемого ударной волной

3. Влияние воздействия высокоскоростного потока микрочастиц на структурные изменения в металлах

Исследование структуры образцов на разных расстояниях от поверхности соударения показало, что распределение микрочастиц по глубине характеризуется значительной неоднородностью. Результаты исследований воздействия потока микрочастиц SiC на микроструктуру образцов из стали 40 и стали 10 представлены на рисунках (15-19).

При движении частиц в преграде формируются каналы и примыкающие к ним зоны претерпевают наибольшие изменения. В поверхностном слое каналов не обнаружено дефектов деформации типа дислокаций и микродвойников. Электронограммы свидетельствуют о том, что тонкий поверхностный слой каналов находится в аморфном состоянии (рис.15). Это объясняется оплавлением металла от тепла, выделяемого при трении проникающей в преграду частицы, и высокой скоростью его последующего охлаждения за счет передачи тепла в массивную металлическую преграду.

Особенностью ударно-волновых процессов в кристаллах является очень быстрый (за времена порядка 10^{-11} - 10^{-12} с) подъем давления во фронте УВ, что создает большие деформации в поверхностном слое преграды и формирует проходящую по преграде волну искажений кристаллической решетки зерен на движущейся границе сжатое состояние – исходное состояние материала преграды. Это обстоятельство вызывает дробление зерен металлов на более мелкие кристаллиты, что подтверждается областями когерентного рассеяния (ОКР, табл.1) полученных при рентгеноструктурных исследованиях.



а - аморфизированная зона в области проникания частицы в сталь 40, $\times 100000$;

б – область проникания микрочастицы в сталь 40, $\times 60000$;

1 – области снятия электронограмм; 2 – фрагмент микрочастицы SiC

Рисунок 15 – Микроструктура вблизи канала проникшей частицы SiC

Таблица 1 – Размеры ОКР кристаллитов металлов до и после воздействия потока микрочастиц SiC

Материал преграды	Кристаллографическое направление	$D_{исх.}, \text{нм}$	$D_{обж.}, \text{нм}$
Армко-Fe	100	65	16
	111	66	18
Ti	110	100	40
Al	100	80	28
	111	75	32

Размеры ОКР кристаллитов после взрывного воздействия лежат в пределах 10-100 нм, причем дробление увеличивается симбатно с ростом давления и повышением жесткости обжимаемого материала. Поскольку увеличение импульсного давления всегда сопровождается ростом температуры, то одновременно с ударным дроблением зерен идет процесс их срастания вследствие тепловой рекристаллизации. Именно поэтому при динамическом нагружении взрывом не удавалось раздробить кристалл до рентгеноаморфного состояния все более сильными ударными волнами. Величину ОКР (10-15 нм) не удается снизить повторным ударным сжатием того же материала. Аморфизации структуры можно добиться в результате нагружения металлов высокоскоростным потоком микрочастиц при их проникании (рис. 15).

Микроэлектронограммы от выделенных участков (рис. 15) свидетельствуют о том, что вдоль траекторий движения микрочастиц структура материала преграды аморфизуется.

В более удаленных от канала зонах структура преграды характеризуется малой степенью деформации. Но по направлению от этих зон к каналам и проникшим частицам выявляется сильно фрагментированная ячеистая и дислокационная структура, прилегающая к аморфной зоне (рис. 16)



а – микроструктура с высокой плотностью дислокаций, $\times 80000$,
 б – сдвиговая деформация и образование микротрещины, $\times 60000$
 Рисунок 16 – Дислокационная структура в стали 10 после воздействия высокоскоростным потоком микрочастиц SiC

На рисунке 17 представлено формирование дислокационного ансамбля, возникновение микрополос и микродвойников (рис. 17, в). Эти типы дефектов зарождаются на концентраторах напряжений – границах зерен и распространяются на большие расстояния независимо от их кристаллографической ориентации. По границам зерен наблюдается сдвиговая деформация (рис. 18). В зонах, непосредственно прилегающих к траектории движения частиц, не содержится дефектов деформации, а вблизи канала выявляется сильно фрагментированная ячеистая и дислокационная структура (рис. 19). Встречающиеся на пути движения микрочастиц границы зерен, способствуют снижению скорости их движения.

В зернах в результате ударного-волнового сжатия должны возникать большие концентрации дислокаций, которые, как известно, подчиняются закону.

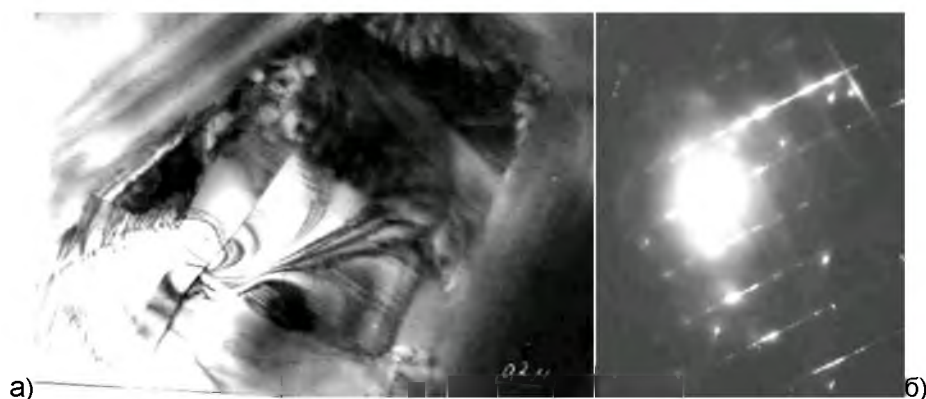
$$\rho_D = \frac{3n}{D^2} \quad (1)$$

где n – число дислокаций на каждой из 6 граней блока.

При $n=1$, используя значения D из таблицы 1, получаем, что плотность дислокаций должна составлять 10^{10} - 10^{12} см⁻². Такие плотности дислокаций были получены экспериментально при ударно-волновой обработке преград из стали потоком частиц SiC, ускоренных взрывом. Методом рентгенофазового анализа установлено, что в рассматриваемых условиях обработки плотность дислокаций, имеет следующие значения: в стали 40-р = $2,1 \cdot 10^{11}$ см⁻², в стали 10-р = $2,4 \cdot 10^{11}$ см⁻²



а) - формирование дислокационного ансамбля на границе зерна; $\times 60000$
 б – микроэлектроннограмма; в – микродвойники в теле зерна; $\times 60000$
 Рисунок 17 – Микроструктура стали 40 после воздействия потока микрочастиц SiC (фракции 50-60 мкм)



а) – $\times 60000$; б – микроэлектроннограмма
 Рисунок 18 – Сдвиговая деформация фрагментов субструктуры в стали 40 после воздействия потока микрочастиц SiC (фракции 50-60 мкм)



а) – $\times 60000$; б) – микроэлектроннограмма
 Рисунок 19 – Ячеистая структура в стали 40 после воздействия потока микрочастиц SiC (фракции 50-60 мкм)

В конструкциях КА широко применяются такие металлы как алюминий, титан и их сплавы. Для подтверждения общих закономерностей структурных изменений и

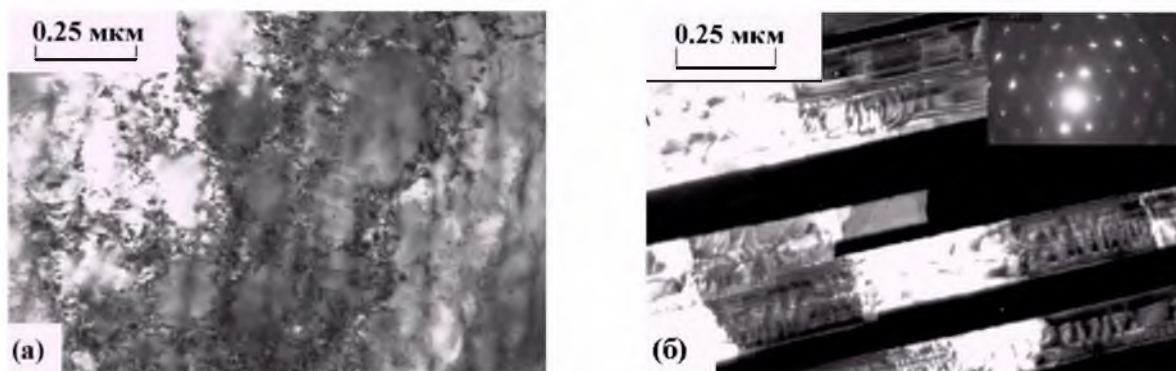
дефектообразования, вызванных процессами высокоскоростной деформации в сталях, проведены исследования микроструктуры алюминия.

На рисунках 20, 21 представлены результаты исследований влияния воздействия ПМЧ SiC на микроструктуру образцов из алюминия.

На рисунке 20,а представлена ячеистая дислокационная структура фольги, вырезанной на глубине ~15 мм от поверхности образца, после воздействия высокоскоростным потоком частиц SiC. Известно, что по размеру дислокационных ячеек, формирующихся в алюминии при нагружении ударными волнами, можно оценить величину давления, действовавшего в каждой из рассматриваемых областей. Следовательно, ячеистая структура (с размером ячеек 0,15-0,3 мкм), приведенная на рисунке 16,а, образовалась под действием давления ~15-20 ГПа, а ячейки с размером 0,7 мкм – при ~5 ГПа. Поскольку размер ячеек в различных участках алюминиевого образца не превышает ~0,7 мкм, то такая структура формировалась под действием высокоскоростной деформации. Ширина двойников, в алюминии, составляет 7-120 нм.

На рисунке 21,б представлен темнопольный снимок деформационных двойников толщиной 60-120 нм, полученный на продольном срезе образца Al на глубине ~14 мм от поверхности нагружения. Наблюдение неоднородного контраста в двойниках (рисунок 20,б) связано с тем, что двойникование при воздействии высокоскоростным потоком микрочастиц осуществляется кооперативным перемещением дислокаций по параллельным плоскостям, при этом скольжение отдельных дислокаций может быть остановлено, что приводит к нарушению укладки атомов. В работе [9] было показано, что двойники и субзерна формируются при воздействии ударными волнами с давлениями 12-28 ГПа, следовательно, в этих областях локальное давление составляло ~14 ГПа.

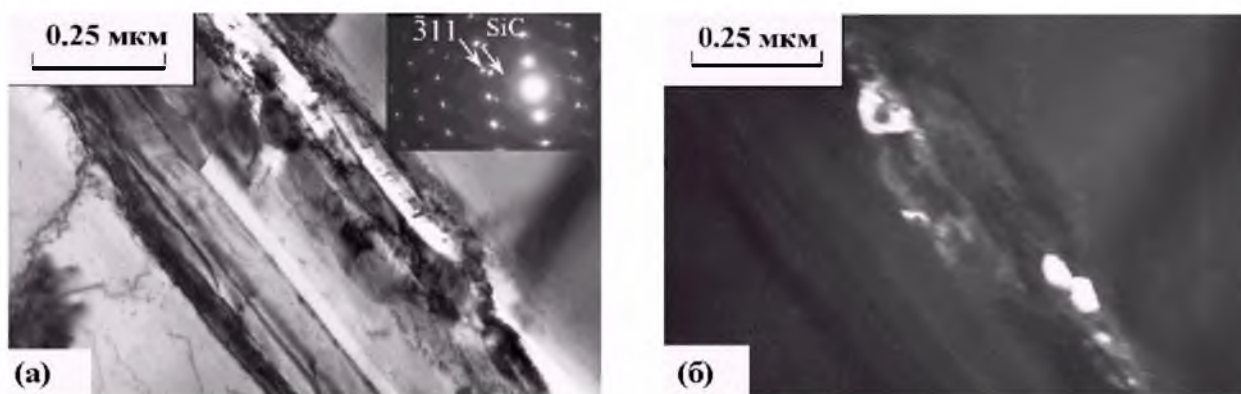
На рисунке 21 представлен участок канала проникания микрочастицы в алюминий. Часть области состоит из вытянутых пластин или двойников толщиной 50-120 нм. Структурные исследования показали, что эта область переходит в участок сильного локализованного течения. Течение носит преимущественно сдвиговый характер, степень деформации составляет ~50 %. Часть пластин представляет собой двойники (рис.21,а). Внутри некоторых сильно искаженных пластин присутствуют частицы SiC, размеры которых составляют ~30 нм, и более мелкие частицы размерами 5-10 нм (рис.21,б). Следовательно, часть области на рисунке 21 состоит из деформационных двойников, тогда как другая ее часть представляет канал проникания частицы, внутри которого видны остатки частицы в виде осколков. При воздействии потоком микрочастиц на алюминий происходит измельчение зерен в 1,5-2 раза.



а) ячеистая дислокационная структура, светлопольное изображение;

б) пакеты двойников, темнопольное изображение

Рисунок 20 – Микроструктура алюминия после воздействия потока микрочастиц SiC с размером 50-60 мкм



а) светлопольное изображение;

б) темнопольное изображение частиц SiC в рефлексах 015 SiC и 014 SiC

Рисунок 21 – Участок канала проникания микрочастиц SiC в алюминий после воздействия потока микрочастиц SiC (фракции 50-60 мкм)

В микроструктуре преград из алюминия, после воздействия потоком микрочастиц, как и в сталях наблюдается высокая плотность дислокаций, ячеистая дислокационная структура, двойники деформации и области локализованного течения. Образование отдельных участков с высокой плотностью дислокаций, ячеистой дислокационной структурой, двойниками деформации, областями локализованного течения, обусловлены возникновением локальных напряжений ударного сжатия, наведенных воздействием высокоскоростного потока микрочастиц, создающего давления 8-20 ГПа, что характерно и для микроструктур других металлов: титана и меди.

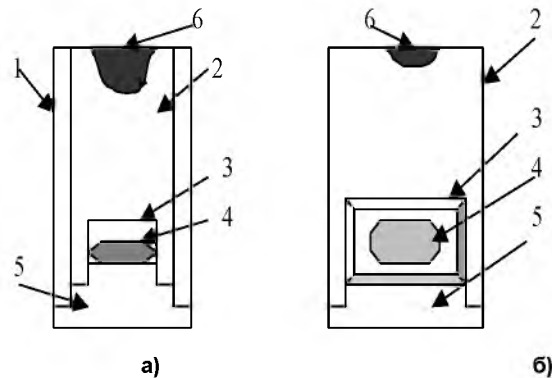
Таким образом, в результате исследования воздействия высокоскоростных МЧ на металлическую преграду, установлены общие закономерности дефектообразования и структурных изменений в металлических материалах.

4 Влияние воздействия высокоскоростного потока микрочастиц на структурные изменения в полимерных материалах

Учитывая, что разрабатываемые композиционные материалы имеют полимерную основу, а микросхемы – пластмассовый или комбинированный корпус, проведены исследования по взаимодействию потоков микрочастиц с преградой из полимерного материала (фторопласта). Выбор фторопласта становится очевидным при сравнении характеристик фторопласта с соответствующими свойствами одного из металлов, например алюминия. Выбор алюминия для сравнения обусловлен тем, что его плотность сопоставима с плотностью фторопласта ($\rho \approx 1800 \text{ кг/м}^3$ для фторопласта и $\rho \approx 2730 \text{ кг/м}^3$ для алюминия). Температура размягчения фторопласта $\sim 125 \text{ }^\circ\text{C}$, что ниже температуры плавления алюминия ($\sim 660 \text{ }^\circ\text{C}$). Это очень существенно для достижения термического разупрочнения в области контакта микрочастица - преграда, и заметно снижает минимальный уровень энергии взаимодействия. С другой стороны, при примерно одинаковом уровне теплоемкости ($c_p \approx 0,7 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ для фторопласта и $c_p \approx 0,9 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ для алюминия), их теплопроводность различается на три порядка ($\lambda \approx 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ для фторопласта и $\lambda \approx 273 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ для алюминия). Это означает, что коэффициент температуропроводности фторопласта ($\alpha \approx 1,59 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$) ниже, чем у алюминия ($\alpha \approx 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$). Это препятствует отводу тепла из зоны взаимодействия, что облегчает процесс разупрочнения и размягчения материала преграды в области непосредственного взаимодействия с проникающей микрочастицей. Таким образом, исходя из соотношения тепловых параметров фторопласта и алюминия, проникание для первого из них должно реализовываться легче, чем для второго.

Однако многие используемые на практике схемы разгона микрочастиц оказываются разрушительными для фторопласта. Аналогичная проблема возникает и для алюминия, поскольку мощный поток частиц приводит к разрушению верхней части образцов. Поэтому, для экспериментальной проверки выдвигаемого здесь предположения об аналогии механизма проникания в металлы и неметаллические материалы использовалась специальная схема разгона, обеспечивающая щадящий

режим взаимодействия. Для предотвращения возможности развития макротрещин фторопласт помещался в стальную обечайку (рис.22,а). Одновременно проверялись защитные свойства фторопласта, в камеру в качестве детектора помещалась микросхема.



а) размещение во фторопластовой камере; б) размещение в алюминиевой камере
 1 – стальная обечайка; 2 – фторопластовый (алюминиевый) корпус; 3 – камера;
 4 – микросхема; 5 – запирающая пробка; 6 – поверхность образца (кратер)
 Рисунок 22 – Схемы исследования воздействия высокоскоростных потоков микрочастиц на ИМС

Диаметр заготовки из фторопласта составлял 40 мм, как и для алюминия. В нижней части камеры размещали микросхемы. Толщина преграды составляла 40 мм. В качестве ускоренных микрочастиц использовали порошок SiC фракцией 50-63 мкм. Для экспериментальной проверки проникания микрочастиц SiC во фторопласт и сравнения его с прониканием в металлы воздействию потоком микрочастиц были подвергнуты образцы двух видов:

- первые были изготовлены в полном соответствии со схемой, приведенной на рисунке 22,а,
- вторые изготавливали целиком из алюминия с камерой для ИМС, в нижней части (рис.22,б).

После воздействия потоком микрочастиц образцы сохранили свою целостность, хотя на верхней поверхности каждого из них образовался кратер. Отличие заключалось в том, что для фторопласта кратер был несколько глубже (примерно на 20-25 %), чем для алюминия, хотя по форме они оказались схожими. Регистрацию микрочастиц, проникших во фторопласт и алюминий производили на микрошлифах поперечных срезов, выполненных через каждые 10 мм от поверхности, с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов.

Установлено, что число микрочастиц для образцов из фторопласта, примерно в 1,7 раза превышает количество зафиксированных частиц в алюминии, что позволяет сделать заключение о более активном проникании микрочастиц во фторопласт.

5 Влияние воздействия высокоскоростного потока микрочастиц на изменения параметров интегральных микросхем

В качестве объектов для исследования воздействия высокоскоростных потоков микрочастиц на деградацию элементов микроэлектроники использовали ИМС двух видов: в металлическом корпусе, и микросхемы (AC10) в пластмассовом корпусе. Последние предназначены для работы на борту КА (рис.23,а). Отличительной особенностью методики испытаний является то, что сами ИМС выполняли роль детекторов. В соответствии с техническими условиями выбранные микросхемы исследованы визуальным осмотром, просвечиванием рентгеновским излучением и тестированием выходных параметров на специальном стенде. На рисунке 23,б представлена структура компоновки элементов микросхемы до обработки потоком микрочастиц.

После тестирования образцы помещали в герметичный металлический контейнер из стали 40 с толщиной стенки 50 или 100 мм. Для предотвращения соударения ИМС

со стенками контейнера свободное пространство заполнялось прокладками из фторопласта и поролона.

Для исключения повреждения микросхемы за счет откольных эффектов внутреннюю поверхность контейнера шлифовали. Контейнер с микросхемами подвергали воздействию потока микрочастиц SiC (фракции 50-70 мкм) в диапазоне скоростей соударения 800-1500 м/с многократно (до трех раз). После такой обработки контейнер разбирали и извлекали микросхемы. Контейнер проверяли на повреждения. Пробои контейнера и потеря герметизации не были обнаружены.

Извлеченные микросхемы исследовали в соответствии с нормами предприятия. Визуальный осмотр, просвечивание микросхем рентгеновским излучением не обнаружили каких-либо дефектов.

После вскрытия корпуса ИМС и исследования под микроскопом на поверхности обнаружены дефекты в виде точечных включений (рис.24,а), а также трещин и включений в области контактов (рис.24,б). По данным микрорентгеноспектрального анализа включения имеют химсостав близкий к составу пластмассового корпуса. Предположительно, включения внесены в результате прохождения интенсивной ударной волны и массопереноса.

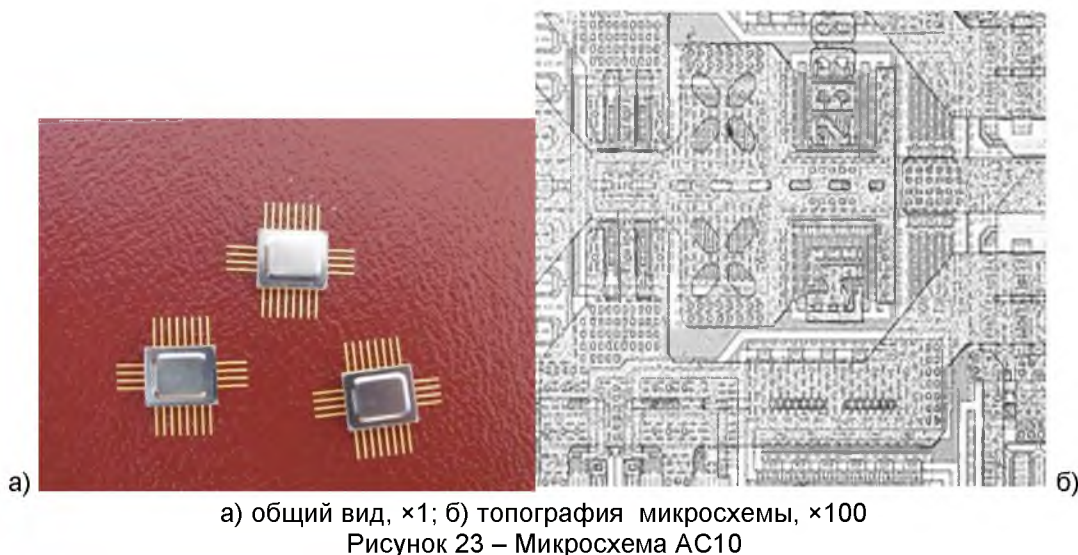
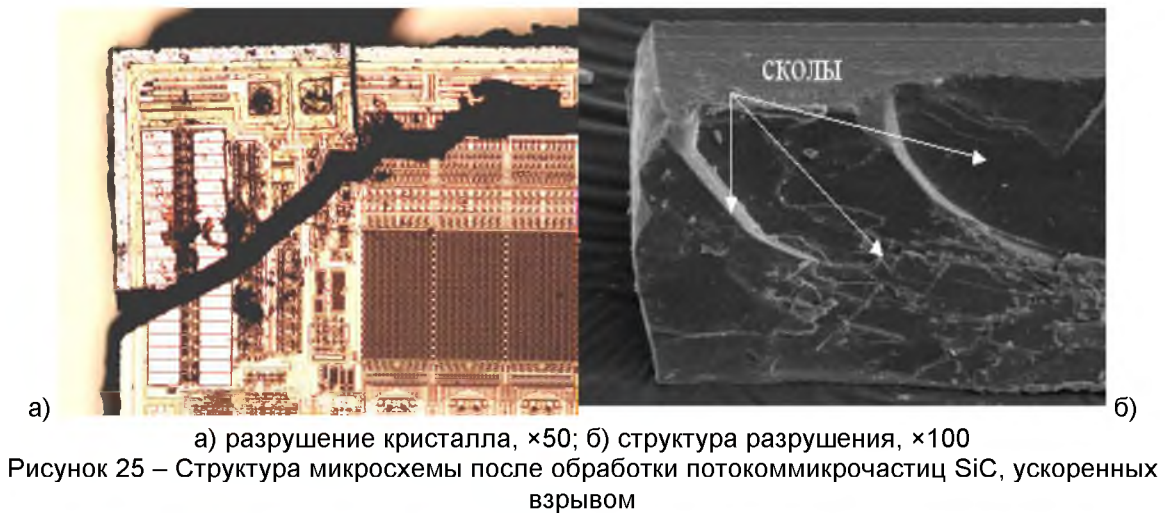
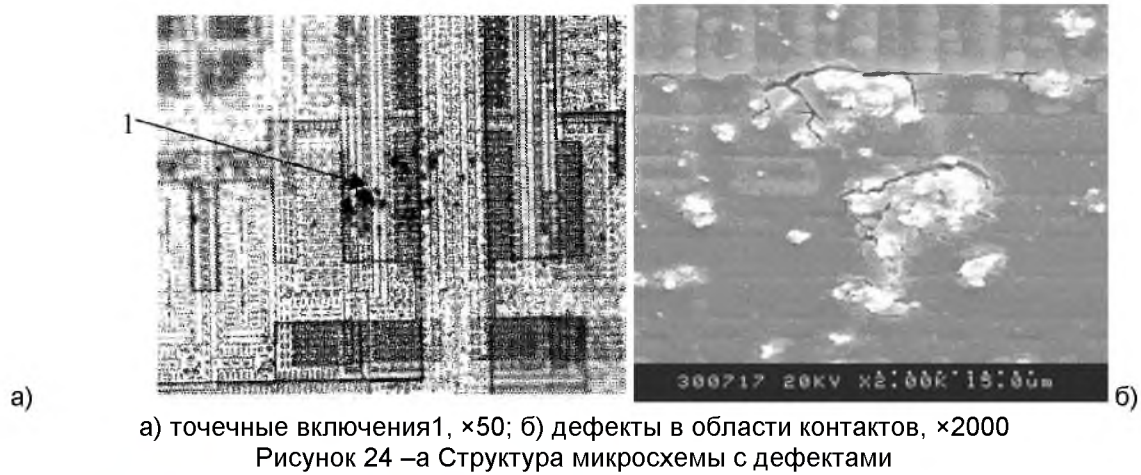


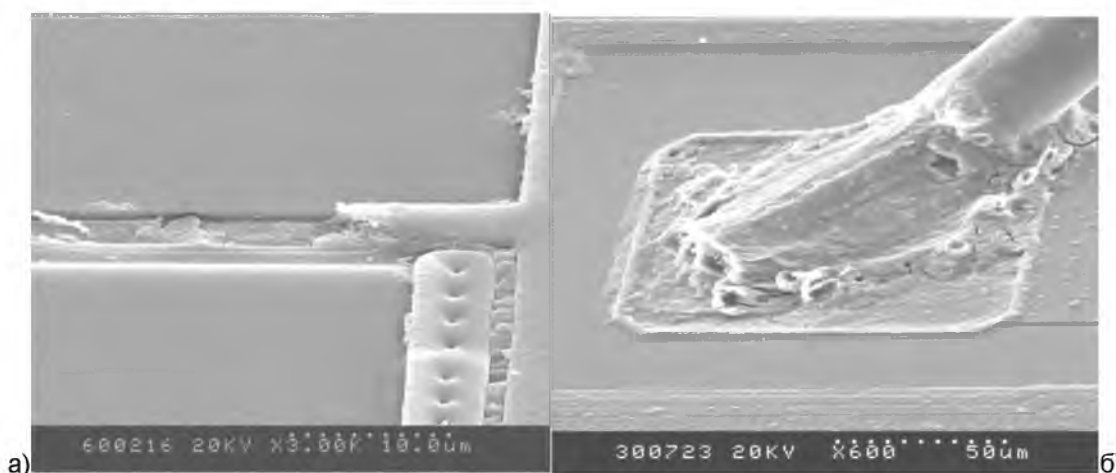
Рисунок 23 – Микросхема AC10

На рисунке 24 представлены структурные изменения, произошедшие с микросхемой в результате воздействия высокоскоростным потоком микрочастиц. В структуре микросхемы, представленной на рисунке 25, видны механические повреждения в виде трещин и сколов, вызванных деформацией ударно-волнового происхождения. Повреждения обусловлены локализацией высоких давлений в микрообъемах и напряжений в области дефектов, являющихся концентраторами и очагами начала распространения трещин.

В результате выполненных исследований зарегистрированы дефекты на поверхности и в объеме кристалла микросхемы, приводящие к ее отказу. На рисунке 26 представлены снимки, полученные с помощью СЭМ, на которых показаны зоны повреждения кристалла микросхемы. В зонах повреждения наблюдаются места микротрещин и включений (рис.26,а), локального разогрева, причем столь существенного, что приводит к росту новых кристаллов из алюминия в области контактных площадок микросхемы (рис.26,б). Механические повреждения в виде разрывов и сколов наблюдали в местах проволочных соединений, дорожек и контактных площадок (рис.27,а,б). Образование таких повреждений можно объяснить возникновением градиента напряжений в местах контакта разнородных материалов. Можно предположить, что это является результатом распределения ударно-волновых возмущений, сложная картина которых возникает из-за несовпадающих во времени отражений от границ раздела разнородных по структуре материалов. Основным результатом ударно-волнового воздействия при высокоскоростном соударении потока

микрочастиц с микросхемой являются механические повреждения в виде микротрещин, разрушений в области токоподводов, деформации с нарушением структуры микросхем.





а) межэлементных соединений микросхемы; б) контактных площадок
Рисунок 27 – Повреждения разводки кристалла микросхем

5.1 Влияние высокоскоростных потоков микрочастиц на изменение характеристик интегральных микросхем в корпусе из многослойного материала

Одним из способов предотвращения нарушающего функциональные свойства ИМС, повреждающего и разрушающего воздействия ПМЧ и сопровождающих его эффектов является создание корпусов из многослойных материалов (ММ) с повышенным уровнем защитных свойств [10-12]. Разработанный ММ применяли для изготовления экспериментальных корпусов ИМС (рис.28).

Испытания ИМС в корпусах из ММ проводили обработкой высокоскоростными потоками частиц SiC с размером 50-60 мкм, по схеме и параметрам, приведенных выше для ИМС в пластмассовом корпусе.

Исследования микросхем после обработки показали, что основную на-грузку динамического ударно-волнового и электромагнитного излучения при-нимает на себя корпус из ММ, т.к. механических повреждений ИМС при их вскрытии не обнаружено. После испытаний в корпусе имели место дефекты и нарушения между слоями аморфной металлической фольги и слоя с наполнителем из SiO₂ (рис.29).



Рисунок 28 – Интегральные микросхемы в корпусах из ММ

На рисунке 30 представлены гистограммы изменений рабочих параметров ИМС в корпусах из разных материалов в зависимости от условий воздействия. Показатели выходных электрических параметров ИМС в корпусе из ММ изменились на 10 % при трехкратном воздействии.

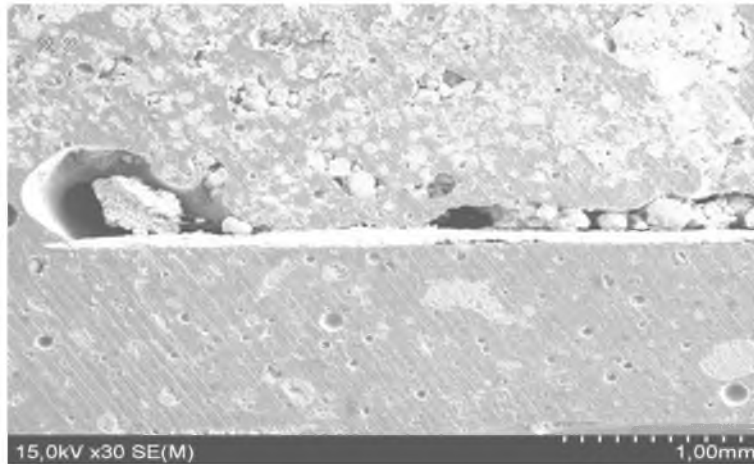
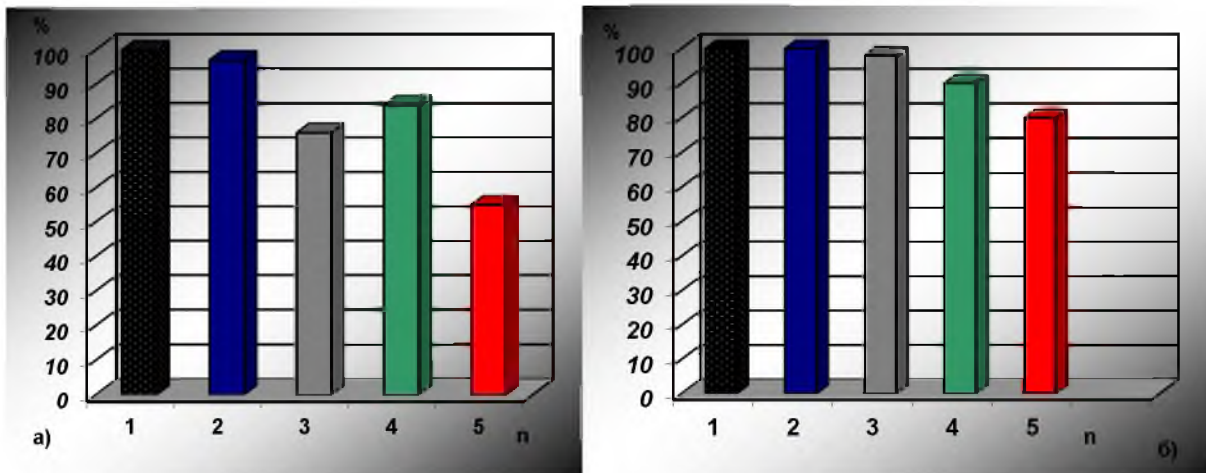


Рисунок 29 – Дефекты по границе раздела слоев корпуса ИМС из ММ

При однократном воздействии параметры микросхем остались в пределах требований технической документации. ИМС в обычном пластмассовом корпусе при тех же условиях испытаний имели отклонения выходных электрических параметров до 40 % от технических требований (рис.30,а).



а) микросхема в обычном корпусе, б) микросхема в корпусе из ММ
 n–N микросхем; % – процент работоспособности ИМС; 1 – ИМС до обработки;
 2 – ИМС, обработанная однократно в контейнере с толщиной стенки 100 мм;
 3 – ИМС, обработанная однократно в контейнере с толщиной стенки 50 мм;
 4 – ИМС, обработанная трехкратно в контейнере с толщиной стенки 100 мм; 5 – ИМС
 обработанная трехкратно в контейнере с толщиной стенки 50 мм

Рисунок30 – Гистограммы изменения работоспособности микросхем в зависимости от режимов обработки

Микросхемы в корпусе из ММ, размещенные в контейнере с толщиной стенки 100 мм, даже при трехкратном воздействии практически не изменили своих рабочих параметров. Однако некоторые из микросхем, не имевшие механических повреждений имели отклонение выходных параметров от допустимых значений до 15 %, что могло быть следствием импульсного электромагнитного излучения.

Заключение

Проведенные исследования показали принципиальную возможность использования взрывных ускорителей в этой относительно новой области научных исследований: экспериментах по моделированию процессов соударения микрочастиц (космической пыли) их воздействия на защитные материалы и элементы микроэлектроники в экстремальных условиях их эксплуатации.

Результаты подобных работ по исследованию различных материалов, подвергавшихся воздействию высокоэнергетических частиц, могут позволить выработать основные технические требования как к полупроводниковым материалам, непосредственно используемым в технологическом цикле создания интегральных микросхем, так и к материалам корпусов микросхем космического применения. На основании этих требований также можно будет проводить работы по созданию новых материалов в полупроводниковой технологии, а также получать материалы с улучшенными защитными свойствами корпусной части, что позволит увеличить сроки эксплуатации интегральных микросхем в условиях космоса и других специальных условиях.

Подтверждением являются результаты экспериментальных исследований воздействия ударно-волнового и импульсного электромагнитного излучения на ИМС в корпусе из ММ. Перспективность применения ММ позволяющих снизить деградацию ИМС, уменьшить воздействие электромагнитного и ионизирующего излучения на 20-30 %, повысить надежность и работоспособность интегральных микросхем в 1,2-1,4 раза.

Список литературы:

1. Ульянов, А.А. Метеоритика, метеориты и присутствующие в них минералы / А.А.Ульянов//Соросовский образовательный, журнал.- 2001.- №2.- С.55-61.
2. Акишин, А.И. Электризация космических аппаратов/ А.И. Акишин, Л.С.Новиков.- Москва: Знание, Космонавтика, Астрономия.- 1986.- С. 64-188
- 3.Акишин, А.И. Физические процессы на поверхности искусственных спутников Земли/А.И.Акишин,Л.С.Новиков.-Москва:Изд-воМГУ.-1987.-С. 89
4. Зиновьева, Н.Г Микроратеры на мишенях экспонированных на околоземной орбите. / Н.Г Зиновьева.[и др.]//Космические исследования-1990.-т.28.-в.1.-С.117-124.
5. Григорян, С.С. О природе «сверхглубокого» проникания твердых микрочастиц в твердые материалы/ С.С. Григорян //Докл. АН СССР.- 1987.- Т.292,№6- С.1319-1323.
6. Акишин, А.И. Методы имитации воздействия окружающей среды на материалы космических аппаратов/ А.И. Акишин, Л.С. Новиков.- Москва: НИИЯФ МГУ.- 1986.- С. 82
- 7.Титов, В.М. Разгон твердых частиц кумулятивным взрывом/В.М.Титов, Ю.И. Фадеенко, Н.С.Титова //Доклады АН СССР.- 1968.-Т.180, вып.5.- С.1051-1053.
8. Лобанов, В.Ф. Кумуляция продуктов детонации полого цилиндрического заряда / В.Ф.Лобанов, Ю.И. Фадеенко //Физика горения и взрыва.-1974.-Т.10, №1.- С. 119-124.
- 9.Горобцов, В.Г. Исследование влияния бомбардировки микрочастицами на структуру стальной мишени / В.Г. Горобцов, К.И. Козорезов, С.М. Ушеренко //Порошковая металлургия: сб. научн. статей /НАН Б; ред. кол.: П.А.Витязь [и др.]. - Минск, -1982.- Вып.6. –С.19-22.
10. Белоус, А.И. Актуальные проблемы защиты элементов микро-электроники, работающих в экстремальных условиях, в том числе космических /А.И. Белоус, В. И. Овчинников, Е.А.Дорошкевич, Т.В. Петлицкая, А.Н. Петлицкий //Сб. трудов 17-й МНТК «Машиностроение и техносфера XXI века» Донецк.Украина: ISSN 2079-2670. ДонНТУ - 2010. - С. 254-258.
11. Овчинников, В.И. Создание средств защиты от воздействия высокоскоростных потоков микрочастиц на элементы микроэлектроники, применяемой в космических летательных аппаратах /В.И. Овчинников, А.Ф. Ильющенко, Е.А. Дорошкевич, А.И.Белоус, А.Н.Петлицкий //Порошковая металлургия: сб. научн. статей /НАН Б; ред. кол.:П.А.Витязь [и др.].- Минск. 2011. Выпуск 34 с.60-67.
12. Овчинников, В.И. Многослойный композиционный материал для корпуса интегральных микросхем, применяемых в космических летательных аппаратах./ В.И. Овчинников, А.Ф. Ильющенко, Е.А. Дорошкевич, А.И. Белоус //Материалы 5-го Космического конгрес. в 2-х томах г.Минск, 2011. т.1 с.76-81.