

PACS: 52.90.+z

В.В. Соболев, С.М. Ушеренко, К.Й. Чой

## К ВОПРОСУ О ДЕСТАБИЛИЗАЦИИ СЛУЖЕБНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ ПОЛЕТАХ

Национальный горный университет  
пр. Карла Маркса, 19, г. Днепропетровск, 49027, Украина

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2004 года

*Экспериментально показано, что в результате соударения сгустка микрочастиц с металлической толстостенной оболочкой реализуется эффект сверхглубокого проникания (СГП). Установлено, что этот процесс сопровождается выбросом с внутренней поверхности защитной оболочки плазменных микроструй, обладающих высокой поражающей способностью по отношению к элементам (микросхемам) электронных систем управления.*

При полетах в космическом пространстве и в стратосфере происходят соударения сгустков пыли с защитными металлическими корпусами управляемых аппаратов. Определение защитных характеристик корпусов модулей и деградации элементов системы управления в этих условиях является актуальной задачей в условиях длительных полетов. Можно достаточно уверенно утверждать, что указанные соударения будут происходить в режиме СГП, а следовательно, без видимых причин возможно поражение микросхем, что ведет к деградации электронных систем управления [1].

Устойчивая работа систем управления летательных аппаратов в реальных условиях полетов определяет максимальную эффективность выполнения полетного задания. Факторы, приводящие к дестабилизации и прекращению работы этих систем, должны стать предметом особого внимания со стороны специалистов.

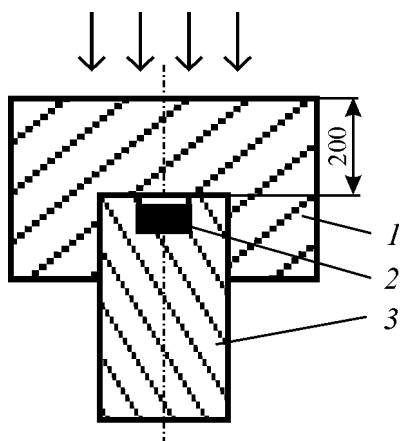
Статистика неудачных запусков указывает на то, что примерно в половине случаев причины аварий остаются невыясненными до конца [2]. Очевидную опасность, по мнению специалистов, представляют соударения с макрообъектами. Ударные взаимодействия с пылевыми объектами продолжительное время не привлекали серьезного внимания. Их рассматривали с известной позиции макроудара и, считалось, что они представляют опасность только для эрозии поверхности. В настоящее время получило широкое признание явление СГП. В многочисленных экспериментах было доказано существование специфической области ударного взаимодействия с макрообъ-

ектами (3–100  $\mu\text{m}$ ), в диапазоне которой стабильно наблюдаются глубины проникания в преграды на  $10^2$ – $10^4$  калибров ударника. Поэтому выполнение исследований по выявлению новых опасных факторов поражения сгустками пыли летательных аппаратов, и в первую очередь их систем управления, представляется актуальным.

Разработанный комплекс экспериментальных методик позволяет регистрировать пробой металлических преград и оценивать кинетические параметры микроударников после пробивания. Благодаря относительно простой методике при скоростях соударения (до 3000 m/s) сгустков микроударников с металлическими преградами удалось зарегистрировать проникание микрочастиц порошка на глубину в десятки и даже сотни миллиметров [3]. Дополнительные эксперименты показали, что после выхода на свободную (тыльную) поверхность в металлических преградах возникают высокоскоростные микроструи с высокой проникающей способностью. Эти струи состоят из элементов вводимого вещества и преграды. Вещество микроструй находится в состоянии плазмы. Образование и движение плазменных струй внутри защитной оболочки приводит к интенсивному электромагнитному излучению. Поэтому поражение биологических и техногенных объектов, находящихся внутри защитной оболочки летательных аппаратов, будет происходить в виде как микропробоев, так и интенсивного локального разогрева. В этом случае сами защитные оболочки становятся источниками высокоэнергетических ионов. Электронное оборудование подвергается бомбардировке ионами из вещества пылевых сгустков и защитных оболочек. Поэтому, меняя исходное вещество сгустка пыли и материал защитной преграды, можно создавать заданный поток ионов. Вероятно, поражение систем управления высокоэнергетическими ионами, которое объясняли соударением с потоками ионов при вспышках на Солнце, следует рассматривать как специфическую реализацию процесса СГП. В этих условиях вероятность реализации последнего существенно возрастает.

В комплексе наличие микроструй и излучения позволило сформировать представление о возможной опасности результатов соударения сгустков пыли с металлическими преградами для работы высокочувствительной электронной базы. По заданию УП «Белмикросистемы» НПО «Интеграл» (г. Минск) была выполнена качественная экспериментальная проверка. Для этого образцы микросхем помещали в специальные стальные контейнеры с толщинами преград 50–200 mm (рис. 1). Потери герметичности, образование открытой пористости в процессе соударения со сгустками пылевых частиц в контейнерах не происходили.

С целью изучения канальных элементов структуры в состав вводимого материала добавляли материалы-ингибиторы, химически активные при травлении. Таким элементом в смесевых составах является, в частности, свинец, но и при использовании соединений на основе бора достигаются аналогичные результаты. Внутри канальной зоны удалось выявить воло-



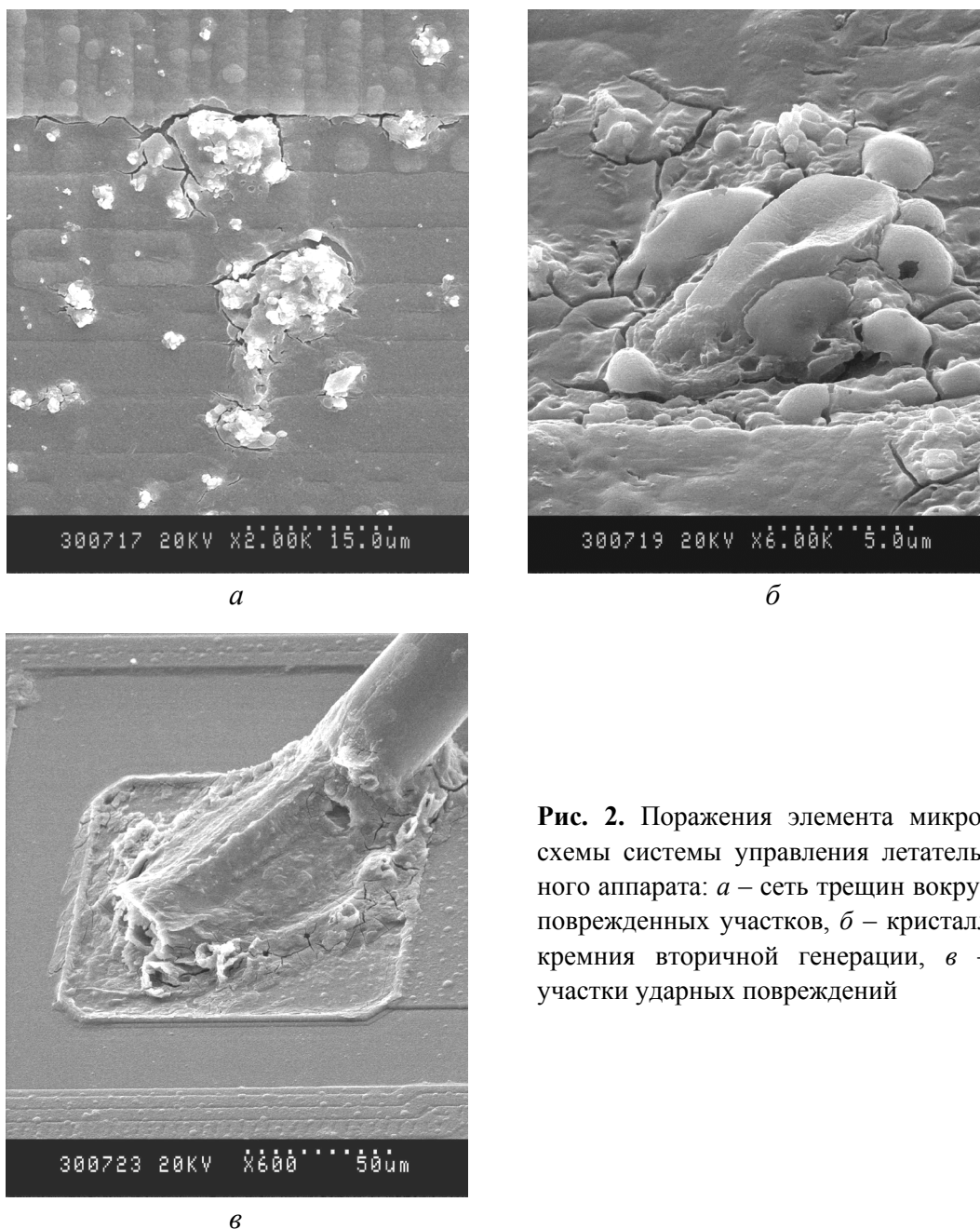
**Рис. 1.** Схема контейнера для импульсных испытаний электронных микросхем в условиях СГП: 1 – стальная крышка, 2 – микрочип в полости, 3 – стальной контейнер. Стрелками показано направление движения ступки частиц

альных повреждений и основные параметры сохраняются. Однако для низковольтных элементов стабильно регистрируется сбой рабочих параметров на 10–85%. Изучение, выполненное после вскрытия оболочки, позволило обнаружить на микросхеме локальные специфические повреждения. Вокруг поврежденных участков возникла сеть трещин (рис. 2,а). Увеличение изображения зоны позволяет видеть проплавление и вздутие матричного материала микросхемы в виде полусфер. Хорошо видны зоны, образовавшиеся при непосредственном воздействии микроструи. На рис. 2,б показана зона матричного материала, в результате нагрева которой вырос микрокристалл кремния. Исследования поверхности подводящего микропровода показывают, что золотое покрытие в зоне контакта частично удалено, появилась сетка микротрещин, видны участки ударных взаимодействий (рис. 2,в). Их рост на керамическом материале основания будет продолжаться до полной релаксации возникших напряжений. Это объясняет отмеченную деградацию электронных систем управления на летательных аппаратах. С учетом того, что в режиме СГП не происходит появления в корпусе открытой сквозной пористости и соответственно не наблюдается разгерметизация, соударение ступков космической пыли с космическими объектами ранее не воспринималось как прямая опасность. Поэтому исследования воздействия новых поражающих факторов на современные летательные аппараты имеют особую актуальность.

Независимо от того, какие порошки использовались для метания (металлы, неметаллы, смесевые составы), зафиксировано пробивание стальных преград толщиной до 200 мм. Однако форма наблюдаемых новообразований

конные структуры, микроанализ которых проводили на наличие регистрируемого металлического элемента. В частности, при использовании борида ниобия в качестве вводимого потоком частиц материала появилась возможность проследить формирование новообразований, армирующих структуру стали. Волоконные новообразования, наблюдавшиеся на глубинах более чем 50 мм, имели другой состав: обнаружен занесенный кислород (до 0.33%), концентрация ниобия выросла до 18%, а концентрация марганца – до 33%. Соответственно изменилась концентрация железа, входящего в состав характерного для этого случая новообразования.

Тестирование элементов системы управления (микросхем) проводили до и после обработки на специальном стенде предприятия УП «Белмикросистемы». В результате было установлено, что элементы не имеют визу-



**Рис. 2.** Поражения элемента микро-схемы системы управления летательного аппарата: *а* – сеть трещин вокруг поврежденных участков, *б* – кристалл кремния вторичной генерации, *в* – участки ударных повреждений

в микроструктуре зависит от состава метаемого материала. При травлении в канальных зонах зафиксированы вытравленные полости или волоконные образования, свидетельствующие о колебательном характере движения проникающих в металл частиц относительно направления движения сгустка. Следовательно, реальная длина канальных образований в материале преграды превышает начальную толщину преграды.

При исследованиях материала стальных защитных преград, подвергнутых воздействию сгустков порошковых частиц, установлено появление локальных специфических новообразований в микроструктуре сталей на различных глубинах, в том числе образование нестехиометрических соединений в

составе таких включений, которые нельзя получить другими известными методами. Повышение исходной прочности стали, используемой в качестве защитного материала, не обеспечивает повышения эффективности торможения сгустка дискретных микроударников, а приводит к дополнительному избирательному выносу легирующих элементов в виде микроструй, возникающих на внутренней поверхности контейнера.

Поражение электронных микроприборов, размещенных во внутренней полости стального контейнера, носит статистически вероятностный характер и достигает 20–25% за один цикл нагружения. Проведенное тестирование микроприборов до и после экспериментов показывает деградацию их рабочих параметров, что позволяет прогнозировать сбои служебных режимов аппаратуры в реальных условиях.

Изучение тонкой структуры материала приборов, показавших изменение рабочих параметров, позволило установить существование в них локальных зон со следами механических повреждений, явно вызванных ударными взаимодействиями. В качестве таких следов воздействия можно назвать пробои металлических и неметаллических элементов микроприбора, возникновение на металлических элементах микрократеров и выдавливание матричного материала на поверхность, частичное удаление гальванического покрытия, трещинообразование на поверхностях, разрыв зон токоподводов. Повреждение неметаллических элементов электронных приборов позволяет прогнозировать дальнейший рост сети трещин и соответственно дальнейшую деградацию рабочих параметров.

Выполненный цикл модельных экспериментов впервые позволил предположить особую опасность ударных взаимодействий металлических модулей с электронной аппаратурой со сгустками пылевых образований в условиях длительных полетов. Вероятность соударения летательных аппаратов со сгустками пыли в режиме СГП возрастает с увеличением времени полета. В этом случае поражение неметаллических элементов систем управления и дестабилизация их работы будут также нарастать во времени. Вероятно также, что многие сбои в функционировании систем управления на этих типах летательных аппаратов могут быть объяснены на основании полученных результатов.

Учитывая вышеизложенное, можно утверждать, что по мере увеличения длительности космических полетов в околоземном пространстве возрастает вероятность соударения с пылевыми сгустками, ведущая к деградации электронной техники на борту станции. Причиной такой деградации являются новые поражающие факторы, возникающие при соударении сгустков пыли с оболочками летательных аппаратов в режиме СГП.

1. С.М. Ушеренко, В.П. Кирилук, А.И. Белоус, А.С. Калиниченко, О.А. Дыбов, В.В. Соболев, Сборник научных трудов Национального горного университета № 18, 65 (2003).
2. А.И. Микиш, Л.В. Рыхлова, М.А. Смирнов, Вестник РАН **71**, 26 (2001).
3. S.M. Usherenko, J. Eng. Thermophys. **75**, 753 (2002).

*V.V. Sobolev, S.M. Usherenko, K.Y. Choy*

## TO THE PROBLEM OF DESTABILIZATION OF SERVICE PARAMETERS OF AIRCRAFTS CONTROL SYSTEM DURING LONG FLIGHTS

It is shown that effect of superdeep penetration (SDP) is realized during collision of microparticle clot with metal thick-wall covering. It is established that the process is accompanied by ejection from inner surface of protective covering of plasma jets, which highly affect elements (microcircuits) of electronic control systems.

**Fig. 1.** Scheme of container for impulse tests of electronic microcircuits in conditions of SDP: 1 – steel cover, 2 – microchip in cavity, 3 – steel container. The arrows show the direction of microparticle clot motion

**Fig. 2.** Damaged microcircuits element of aircraft control system: *a* – net of cracks around damaged sections, *b* – crystal of silicon of second generation, *c* – sections of shock damage