





Белорусский национальный технический университет, Национальная академия наук Беларуси, ОАО "ИНТЕГРАЛ" - управляющая компания холдинга "ИНТЕГРАЛ", Минск, Республика Беларусь

Исследование взаимодействия материалов космических аппаратов с высокоскоростными потоками космической пыли

Ушеренко Юлия Сергеевна, Доцент, кандидат технических наук

А. И. Белоус, А. Н. Петлицкий, С. А. Ленкевич

Важнейшую роль в обеспечении длительной безотказной работы космических аппаратов играет устойчивость их конструкционных материалов и элементов бортового оборудования к воздействию окружающей космической среды. По оценкам экспертов, более половины отказов и неисправностей оборудования на борту космического аппарата обусловлено неблагоприятным воздействием факторов космического пространства.



На космический аппарат в полете влияет широкий спектр факторов космического пространства: высокоэнергетические потоки электронов и ионов, холодная и горячая космическая плазма, солнечное электромагнитное излучение, метеоритное вещество, твердые частицы искусственного происхождения и другие факторы.

В результате этого воздействия в материалах и элементах бортового оборудования космических аппаратов происходят различные физико-химические процессы, приводящие к ухудшению их эксплуатационных параметров.

В зависимости от характера процессов, инициируемых воздействием космической среды, происходящие изменения свойств материалов и элементов оборудования могут иметь различную временную шкалу, быть обратимыми или необратимыми, представлять различную опасность для бортовых систем.

Многообразие факторов, влияющих на космический аппарат, комплекс энергетических спектров космического корпускулярного и электромагнитного излучения, возможность факторов космического действия в различных комбинациях и в разных временных последовательностях – все это существенно усложняет изучение и прогнозирование изменений свойств материалов и характеристик бортовых систем космических аппаратов в космической среде.



Твердые частицы с поперечными размерами менее 1 мм можно рассматривать как постоянно воздействующий на космические аппараты фактор, характеризуемый плотностью их потока. Для более крупных тел обычно вычисляется вероятность их столкновения с космическими аппаратами или с отдельными фрагментами конструкции за некоторый временной интервал.

Долгое время столкновения потоков частиц пыли с модулями космических аппаратов рассматривались только с позиции эрозии внешней поверхности. Последние эксперименты показали, что когда потоки частиц космической пыли сталкиваются с оболочкой космического аппарата, это вызывает возникновение плазмы, что в свою очередь приводит к появлению электромагнитного излучения, способного вывести из строя близлежащее электрооборудование и поверхностные механические повреждения*.

Это означает, что требуется дополнительная защита уязвимых частей, что увеличивает вес и, следовательно, стоимость

 * Fletcher A, Close S, 2017 Physics of plasmas 24, 053102
 Nuttall A, Close S 2020 Int. J. Impact Eng. 144 103645
 Новиков Л.С. Космическое материаловедение. Учебное пособие. – М.: Макс Пресс, 2014. – 448 с. Изображения некоторых участков ikbajd микрометеоритов, найденных в Антарктике.







Динамическое легирование в режиме сверхглубокого проникания (СГП)

 характеризуется одновременным воздействием на материал различных физических факторов (высокое давление, значительные градиенты давления внутри твердого металлического тела, зоны интенсивного растяжения и сжатия, температура, излучение и т.д.).

Такое комплексное воздействие происходит во временном интервале 10-9-10-4 с, что существенно меняет условия тепло- и массо обмена. Интенсивность нагрузки настолько высока, что возможны разрушения или необратимые изменения в объектах, на который она действует. При импульсных и ударных воздействиях в материале могут образовываться области возмущения со сложным напряженно-деформированным состоянием и метастабильные структурные элементы.

Явление сверхглубокого проникания (СГП)

Обычный открытый кратер при макроударе





Захлопнувшийся канал (кратер) при сверхглубоком проникании





Экспериментальные методы

Динамическая обработка в режиме СГП проводилась внутренними и наружными ускорителями в следующих условиях: средняя скорость частиц 1000-3000 мс-1, время экспозиции - 400 мкс, материал образцов: литейный технический алюминий А7 (99,7% AI, межгосударственный стандарт ГОСТ 11069-2001, DIN 3.0275), качественная конструкционная углеродистая сталь 45 (0,42–0,5% C, межгосударственный стандарт ГОСТ 1050-2013, DIN C45) алифатический полиуретан, качественная конструкционная углеродистая сталь 10 (0,07-0,14% C, межгосударственный стандарт ГОСТ 1050-2013, DIN C10), материал частиц порошка (ударники) – порошок SiC (карбид кремния) (основной), 63-70 мкм, порошок AI, 10-70 мкм или порошок Sn (олово) 10-70 мкм, полиэтилен высокомолекулярный Cestilene HD1000, высокомолекулярный кристаллизованный полимер фторопласт-4 (Teflon)

Методика подготовки образцов включает резку, полировку и травление в 4 % азотной кислоте. Структуры исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа (CЭM) Hitachi s-4800 и MIRA3 TESCAN, элементный анализ проводили методом QUANTAX EDS (P/B ZAF).

На образцах, предназначенных для изготовления шлифов, измеряли твердость по Бринеллю НВ. Образцы разрезали по глубине образца с шагом 20 мм. Для образцов алюминия измерения проводились с использованием нагрузки 2450 Н и стального шарика диаметром 5 мм.

Для измерения электрического сопротивления пластины вырезали из материала мишени (40 мм, длина 150 мм) с помощью электроискровой обработки. С каждого образца вырезали по 4-5 пластин в поперечном и продольном направлениях. Электрическое сопротивление определяли как среднее значение 10 -15 точек измерения. Электрическое сопротивление, измеренное на обработанном образце двухзондовым методом, сравнивали с измерениями на исходном материале.

Исследовано распределение работы электрона по поверхности пластин в продольном и поперечном направлениях. Топология электронной рабочей функции поверхности пластины регистрировалась методом сканирующего зонда Кельвина



Скорость потока частиц 300-3000 м/с

1-детонатор; 2 - облицовка для взрывчатки;
3- заряд взрывчатого вещества;
4кумулятивная линза;
5- порошковый состав;
6 - пластина – основание картриджа;
7- регулирующая опора;
8- преграда.*

*Usherenko, Y., Mironovs, V., Usherenko, S., Lapkovskis, V., Gluschenkov, V. Powder particle flow acceleration methods for simulation of interaction with materials used in spacecrafts, Agron. Res. 2019.17(6).pp 2445-2454. <u>https://doi.org/10.15159/ar.19.213</u>



1 - зарядная камера;

2 - ствол диаметром 16 мм;

3-камера разгерметизации пороховых

- газов; 4 измеритель скорости;
- 5 держатель образца;
- 6 вакуумная камера



Образцы после обработки



Структура Al99,7 % после динамического нагружения потоком частиц SiC



 а – точка анализа в зоне структурного элемента, образованного частицами карбида кремния и материалом матрицы; b – результат количественного анализа зоны, показывающий наличие Si, оставшегося от частицы SiC

Влияние динамического легирования на изменение твердости по Бринеллю НВ и относительной твердости НВ %=($\frac{HB_{res}-HB_{init}}{HB_{init}}$) для алюминиевых сплавов Al99,7% и Al-12% Si по глубине образцов*

Глубина образца от верха [мм]	AI – 12 % Si Относительная твердость[%]	AI 99.7 % Относительная твердость [%]
20	-	+ 9.6
40	+ 34.0	+ 8.4
60	+ 20.9	+ 8.4
80	+ 20.9	+ 8.4
100	+ 20.9	+ 4.3
120	+ 20.9	- 1.1
140	+ 20.9	- 7.0
160	+ 15.2	- 7.0
180	+ 9.6	- 7.0
Исходная твердость материала HBinit [%]	56.9 (100%)	34.2 (100%)

Note: HBresis - твердость после динамического легирования, HBinit исходная твердость материала.

*Usherenko, Y., Mironovs, V., Usherenko, S. Analysis of the effects of dynamic alloying on the structure of aluminium and its alloys. Solid State Phenomena 2021.320. Pp. 8-13.

https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.320.8

Измерение электрического сопротивления в продольном направлении*

Таблица 1. Электрическое сопротивление пластин из технического алюминия А7, продольное направление					
Образец	Среднее электрическое сопротивление раv, 10-8 Ом·м				
1.Исходный	5.2792				
2. Обработанные в режиме динамического легирования	4.4192				
3. Обработанные в режиме динамического легирования	4.4118				

Обработанный алюминийраvSDP = (pavSDP1 + pavSDP2)/2 = 4.4155·10⁻⁸ Ом·м

• Таким образом pavSDP/pavInitial=0.8364 В связи с чем, установлено, что электрическое сопротивление в продольном направлении после обработки уменьшилось на 16.36%.

*Usherenko, Y., Mironovs, V., Usherenko, S., Reut, O., Lapkovskis, V. Properties of technical aluminum under the effect of dynamic alloying. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021.1140. Pp.012037 <u>https://doi.org/10.1088/1757-899X/1140/1/012037</u>

Измерение электрического сопротивления в поперечном направлении

Таблица 2. Электрическое сопротивление пластин из технического алюминия А7, поперечное направление

Образец	Среднее электрическое сопротивление ра∨, 10-8 Ом∙м			
1. Исходный	6.3785			
2. Исходный	6.4756			
1.Обработанные в режиме динамического легирования	9.3896			
2. Обработанные в режиме динамического легирования	8.7530			
3. Обработанные в режиме динамического легирования	8.9770			
4. Обработанные в режиме динамического легирования	9.2366			

- Исходный алюминий А7 pav initial= (pav2 + pav3)/2 = 6.4270 ·10⁻⁸ Ом·м.
- Обработанный алюминийраv SDP = (pavSDP1 + pavSDP2 + pavSDP3 + pavSDP4)/4 = 9.08905·10⁻⁸ Ом·м
- Тогда pav SDP/pav initial = 1.4126, т.е. электрическое сопротивление после обработки в режиме динамического легирования увеличилось на 41,26%.

Изменение относительного электрического сопротивления по глубине образца технического алюминия А7



14

Электрическое сопротивление технического алюминия А7 во взаимно перпендикулярных направлениях в зависимости от характера обработки

Таблица 3. Электрическое сопротивление технического алюминия А7 во взаимно перпендикулярных направлениях, в зависимости от характера обработки

Направление измерения	Исходное электрическое сопротивление р _і , 10 ⁻⁸ Ом∙м	Электрическое сопротивление после обработки pSDP, Ohm∙m	ρ _{i1} /ρ _{i2}	ρSDP ₁ /ρ _{i1}	ρSDP₂/ρ _{i2}	ρSDP₁/ρSDP₂
1-поперечное	6.427	9.089	1.217	1.413	0.836	2.058
2-продольное	5.279	4.416				

Производство обычной алюминиевой заготовки методом литья приводит к анизотропии электрического сопротивления в продольном и поперечном направлениях на 21% (pi1/pi2). Дополнительная высокоэнергетическая обработка такой заготовки, как и ожидалось, увеличила анизотропию электрического сопротивления до 2,05 раза (pSDP1/pSDP2).

Топология электронной рабочей функции технических алюминиевых пластин А7 после обработки СГП



- А продольный разрез,
- Б поперечное сечение,
- С поперечное сечение исходного технического алюминия А7

Эта неравномерность распределения работы выхода электрона EWF в продольном и поперечном сечениях образца коррелирует с регистрируемым изменением электрического сопротивления в продольном и поперечном направлениях (табл. 3).

Структура и состав исходной стали 45 и стали 45 после обработки в режиме СГП



Образцы стали 45 обрабатывали в режиме СГП на глубину до 100 мм с использованием порошковой смеси на основе карбида кремния с добавлением порошка олова (SiC -70%, Sn – 30%).





Таблица. Среднее изменение твердости стали 45

Образцы	НВ, перед закалкой	НВ, после закалки
Исходная сталь	113.0	640.0
После обработки	125.3	653.0

За счет динамического нагружения в режиме СГП достигнуто изменение состава, структуры образцов и повышение твердости образцов на 10% (до закалки) и на 2% (после закалки)

Зона формирования канала в обработанной стали 45 (остаток частиц SiC)



Структура стали P6M5 с канальными элементами после динамического легирования в режиме СГП потоком порошков SiC+Ni и последующей закалки. (а) Микроструктура стали P6M5 с каналами; (b) канальные элементы.

Твердость стали Р6М5 после динамического легирования в режиме СГП

Образец	НВ средняя до закалки	HRC средняя до закалки	НВ средняя после закалки	HRC средняя после закалки
1. Исходный	223	21,0	61,7	635,1
2.SiC+ Ni	217 (-2,7%)	20,1	59,3 (-3,8%)	601,0
3.TiCN+ Ni	235,5 (+5,6%)	22,9	64,7 (+4,8%)	665,6

 Исследование твердости стали P6M5 показало, что динамическое легирование в режиме СГП порошками SiC+Ni привело к снижению твердости незакаленной стали на 2,7%, а после закалки - на 3,8%. В то же время использование смеси порошков TiCN+Ni обеспечило повышение твердости стали P6M5 на 5,6% и закаленной стали на 4,8% по сравнению с исходной закаленной сталью P6M5. Изменение механических свойств при динамическом легировании косвенно указывает на изменение физических свойств материала, а особенности процесса динамического легирования в режиме СГП должны увеличивать анизотропию обрабатываемого материала.*

Структура зоны контакта металл (верхняя)-полимерная (нижняя) после динамического легирования потоком частиц порошка SiC+AI



Стрелки показывают направление движения ударной волны. Овалы обозначают остатки потока (элементы канала)*





50µm



Зона микроанализа конструктивного элемента из остатков порошкового струйного материала в полимерной матрице и распределение следов ударных элементов из карбида кремния и алюминия.







Макроструктура образца марки Cestilene HD1000 с открытым дном после динамической обработки

Стрелками показано направление движение ударной волны





Глубина обнаружения и микроструктура вокруг порошковой частицы-ударника SiC в матрице из Cestilene HD1000.



Трещины на поверхности образца фторопласт Ф-4 без крышки, образовавшиеся под воздействием ударной волны и ее микроанализ





100µm





а) вершина образца



б) глубина 7 мм

Повреждение микросхем

Микросхема в заземленном металлическом контейнере была подвергнута обработке пылевыми сгустками в режиме сверхглубокого проникания. Были получены различные варианты повреждений этих микросхем. Одним из вариантов экспериментально регистрируемого повреждения является испарение гальванического покрытия на токоподводе в месте контакта с поверхностью

В результате воздействия высокочастотного электромагнитного поля на зону контакта между токоподводом и неметаллической основой микросхемы (монокристалл Si) наблюдается испарение алюминия. Параметры испарения покрытия приведены в таблице

Таблица Изменение параметров токоподвода в микросхеме под действием электромагнитного излучения.



Длина участка испарения алюминия покрытия, мкм	Внешний диаметр покрытия токоввода, мкм	Внутренний диаметр покрытия токоввода, мкм	Объем покрытия на проводе, мм3	Macca покрытия- MCoverage, кг	Удельная теплота испарения, МДж/кг	Скорость испарения, г/(см2·сек)
57	19	17	3590·10 ⁻⁹	9,6.10-9	10,5	0,85.10-4

Жесткий режим поражения микросхем

Картридж для испытания

Микросхема,×70





Трещина от микроструи, ×300.



Мягкий режим поражения микросхемы

×400



×2000



×3000



×5000



300720 20KV X5.00K 6.0ům

Заключение

Динамическое легирование в режиме СГП приводит к изменению механических свойств и физических свойств (электрического сопротивления) металлов и сплавов.

На основании полученных экспериментальных данных об изменении структуры и свойств материалов под воздействием высокоскоростных потоков частиц можно сделать вывод, что такие постоянные потоки космической пыли оказывают существенное влияние на материалы, конструкции, систему управления космическими аппаратами.

Использование метода динамического нагружения материала высокоскоростным потоком частиц порошка (в режиме СГП) обеспечивает простой и эффективный способ проверки поведения материалов и электронных систем в наземных условиях.

Спасибо за внимание!

osher yu@mail.ru