

Т. В. Сидоренко*

КОСМІЧНИЙ ВАКУУМ ТА ЙОГО ВПЛИВ НА МАТЕРІАЛИ, КОНСТРУКЦІЇ Й ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕРОЗ'ЄМНИХ З'ЄДНАНЬ: ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Представлено загальний огляд літературних джерел про основні параметри космічного вакууму та його вплив, що здійснюється на матеріали та компоненти апаратури, яка працює у космічному середовищі. Особливу увагу приділено впливу глибокого вакууму на експлуатаційні характеристики нероз'ємних з'єднань конструкцій бортової та наукової апаратури, зокрема розглянуто зміни механічних, теплофізичних та оптичних властивостей, процеси адгезії, тертя, паяння, втрати маси тощо.

Ключові слова: вакуум, адгезія, паяння, нероз'ємні з'єднання.

Вступ

Для експериментів та технологічних процесів, що проводяться на борту діючих космічних апаратів, доцільно використовувати весь комплекс специфічних умов, обумовлених глибоким вакуумом. Однак при тривалому використанні вакуум досить суттєво впливає на роботу систем вказаних апаратів [1].

Сучасний етап розвитку космонавтики дозволив перейти до створення орбітальних науково-дослідницьких комплексів, які здатні тривало функціонувати в космосі. Найважливіше значення у забезпеченні безпечної, довгострокової та безвідмовної роботи апаратури в космічних умовах має стійкість елементів і матеріалів їх конструкції до впливу факторів космічного середовища, а також можливість при потребі відновити працездатність певних вузлів.

Отже, побудова таких комплексів потребує розробки способів отримання нероз'ємних з'єднань, різання, а також ремонту металоконструкцій у відкритому космосі [2].

Космічні умови характеризуються сукупністю впливів космічного середовища, до яких відносяться [3] глибокий вакуум, невагомість, температура (частіше за все наднизька), електромагнітні та корпускулярні випромінювання, наявність метеорних частинок, магнітні та гравітаційні поля планет та зірок тощо.

Давно доведено принципову можливість і доцільність проведення в умовах глибокого вакууму та невагомості процесів плавлення, різання, зварювання, паяння матеріалів, а також напилення металічних покриттів за допомогою різних джерел нагрівання. Проводяться систематичні дослідження, які спрямовані на вирішення цих проблем.

Зокрема, в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України накопичено великий об'єм експериментальних даних по зварюванню

* Т. В. Сидоренко — кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ.

основних конструкцій в умовах, які моделюють космічні. Проведено навіть експерименти по зварюванню безпосередньо в космосі [2]. Але слід зазначити, що в умовах космосу саме паяння є досить конкурентоздатним, а в ряді випадків й єдино можливим способом отримання нероз'ємних з'єднань.

З переваг паяння, що важливі при проведенні робіт в експериментальних умовах, слід відмітити малу енергоємність і високу технологічність. Крім того, паяне з'єднання припускає розпаявання, а отже, й ремонт конструкцій. За допомогою паяння можна з'єднувати різнорідні неметалічні й термічно нестабільні матеріали без втрати властивостей [2].

Так, якщо нагрівати метал на Землі, то заздалегідь відомо, що крапля розплаву впаде вниз, а легкі гази попрямують догори. В космічному вакуумі і крапля рідкого металу і газовий пухирець важать однаково — нічого. Й вони не поспішають "відмежуватися" один від одного. Тому у зварних швах на зразках, наприклад, деяких алюмінієвих сплавів виявлено підвищену поруватість.

Космічні апарати при необхідності можуть бути піддані досить серйозному ремонту безпосередньо в космосі. Роботи, пов'язані, зокрема, з паянням, можуть знадобитися й під час монтажу крупних орбітальних станцій, які споруджуються з роздільно піднятих на орбіту блоків. Для цього необхідно створити обладнання, технологію та пристрої, які полегшуватимуть роботи в космосі й забезпечуватимуть їх повну безпеку [4].

Вакуум: загальне уявлення та класифікація

У класичній фізиці критерієм існування в будь-якому об'ємі вакууму (вакуум — від лат. *vacuum* — порожнеча) приймається умова, за якою довжина вільного пробігу молекули, тобто без зіткнень з іншими молекулами, повинна бути більшою, ніж лінійні розміри об'єкту, що розглядається. Однак поняття вакуум має три основні значення — різні для фізики, техніки та космічних досліджень.

У роботі [5] висловлено гіпотезу на основі теорії електрослабкої взаємодії про те, що вакуум складається з конденсату скалярних бозонів, включаючи бозони Хіггса, та енергії зв'язку, яка може бути порівняна з масами частинок, що входять до нього. В роботі [6] зазначається, що квантова теорія передбачає, а експерименти підтверджують факт, що порожній простір (вакуум) містить величезну кількість залишкового фону енергії, відомої як нульова енергія (ZPE). Вихідна ідея, розглянута в цій роботі, полягає в тому, що така енергія має значення тільки для таких езотеричних проблем, як малі збурення в процесах атомних викидів, які на даний час, як відомо, відіграють важливу роль у масштабних явищах і представляють інтерес для технологів, наприклад, інгібірування спонтанного випромінювання, генерації сили тяжіння малої дальності та можливості обліку явищ сонолюмінесценції.

За думкою Х. Оганяна, вакуум може бути визначений як стан без частинок й, виходячи з моделі класичного спіну (як кільцевий хвильовий пакет) [7] (наслідуючи термінологію F. J. Belinfante [8] — циркулюючий потік енергії), може розглядатися як система, що складається з кільцевих

хвильових пакетів електронів й позитронів, а не власне електронно-позитронних пар.

У 1998—1999 рр. дві групи астрономів-спостерігачів під керівництвом А. Райса й С. Перлмуттера відкрили антигравітацію [9]. Головний сенс відкриттів може бути зведений до наступного. У Всесвіті, який спостерігаємо, домінує фізичний вакуум; за густиною енергії він перевищує усі інші форми космічної матерії. Вакуум створює космічну антигравітацію, що керує динамікою космологічного розширення у сучасну епоху.

У таких експериментах присутність вакууму безсумнівна, але при цьому значення його енергії не вимірюється. Це зумовлено тим, що в усіх, крім гравітації, фізичних взаємодіях проявляється лише різниця енергій фізичної системи в різні моменти часу та/або в різних точках простору, але не величина енергії (в такому стані фізичної енергії). Лише гравітація “відчуває” саму енергію, а не її різницю. Проблема вакууму, його фізична природа є, за припущенням [10, 11], найбільш важливою й разом з цим найбільш складною в усій сучасній фундаментальній фізиці.

Фізичним вакуумом називається простір, в якому немає частинок речовини й встановився найнижчий енергетичний стан, коли середнє число квантів фізичних полів дорівнює нулю. Однак у вакуумі експериментально виявлено наявність віртуальних елементарних частинок, що народжуються й зразу ж зникають. Вони здатні впливати на перебіг фізичних процесів. Наприклад, реально зареєстровано поляризацію електромагнітного випромінювання на таких частинках [12].

В роботі [13] А. Є. Акимов пропонує розглядати фізичний вакуум як складний квантово-динамічний об’єкт, який проявляє себе через флуктуації. Подібна інтерпретація базується на концепціях С. Вайнберга, А. Салама та Ш. Глешоу. А, наприклад, в роботі [14] фізичний вакуум представлений як матеріальне середовище, яке ізотропно заповнює весь простір, має квантову структуру і не спостерігається у незбуреному стані.

За словами А. Д. Чернина, вакуум присутній усюди й фігурує в атомній фізиці та мікрофізиці, де розглядається як найнижчий енергетичний стан квантових полів [15]. Це той самий вакуум, в якому відбувається взаємодія елементарних частинок. Фізичний вакуум безпосередньо проявляється експериментально, наприклад, у лембівському зсуві спектральних ліній атомів та ефекті Казіміра.

Прийнято вважати, що вакуум має не тільки певну густину енергії, але й тиск. Якщо густина вакууму позитивна, то його тиск негативний. Зв’язок між густиною і тиском, тобто рівняння стану для вакууму, безпосередньо виводиться в теорії квантових полів [16]. Але значення його густини отримати поки що не вдається [17].

У техніці вакуумом називається стан газу, при якому його тиск нижче стандартного атмосферного тиску, що дорівнює 101,325 кПа. У табл. 1 наведено загальноприйняті ступені технічного вакууму. На висоті 50 тис. км над поверхнею Землі тиск становить близько $1 \cdot 10^{-19}$ Па, тобто концентрація молекул дорівнює ~ 4 молекули в 1 см^3 . Така концентрація вже близька до стану космічного вакууму.

Таблиця 1. Градація технічного вакууму [12]

Table 1. Gradation of technical vacuum [12]

Ступінь (градація) вакууму	Діапазон тиску, Па	Діапазон висот над поверхнею Землі з таким же діапазоном тиску, км
Низька	>100	<50
Середня	$100—0,1$	$50—85$
Висока	$0,1—1 \cdot 10^{-5}$	$85—250$
Надвисока	$<1 \cdot 10^{-5}$	>250

У навколоземному міжпланетному просторі концентрація атомів становить порядку декілька атомів в 1 см^3 . В основному вони є компонентами сонячного вітру і тому іонізовані. У міжзоряному просторі, поза газовими хмарами, концентрація атомів майже в десять разів менша. В середині газових хмар вона приблизно така ж, як і в міжпланетному просторі. Таким чином, враховуючи ще й існування космічного пилу, слід зазначити, що космічний вакуум — це зовсім не порожнеча [12].

Космічний вакуум можна визначати як стан космічної енергії, що має постійну у часі й повсюди однакову в просторі густину — і притому в будь-якій системі відліку. Однак властивості вакууму принципово відрізняються від усіх інших форм космічної енергії, густина яких неоднорідна в просторі, падає з часом в ході космологічного розширення й може бути різною в різних системах відліку [15].

В роботі [18] класичний космічний вакуум розглядається як порожнеча, в якій відсутні усі частинки матерії у вигляді твердих тіл, рідин або газів і яка є вільною від усіх теплових та інших видів випромінювання у холодній порожнечі (при абсолютному нулі) 0 К .

За словами М. Д. Нусинова, космічний вакуум — це розріджена газоподібна матерія космосу, що представляє собою одне з найцікавіших природних явищ [19]. Космічний вакуум здійснює різноманітний вплив на матеріали, вузли та блоки бортових наукових приладів, що знаходяться поза гермовідсіків космічних літальних приладів.

Отже, космічний вакуум відрізняється від лабораторного величезною різноманітністю фізичних умов та явищ, найважливішими з яких є, зокрема:

- низька концентрація газових частинок в космосі $n \ll 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$;
- різноманітні маси та швидкості частинок (m_i, v_i); широкі інтервали зміни швидкостей ($10^2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} < v < 10^6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$) й концентрацій частинок;
- низький коефіцієнт повернення $Z \rightarrow 10^{-2}—10^{-4}$ для частинок різних мас m_i ;
- необмежена поглинальна здатність космічного вакууму ($V_s \rightarrow \infty$);
- наявність різних типів випромінювання, наприклад $e, p, \alpha, \gamma, h\nu$.

З позицій моделювання впливу космічного вакууму на матеріали й елементи усі фактори можна умовно поділити на види: механічні, тепло-

й електрофізичні та поверхневі (втрати маси, адгезія, тертя та знос). Моделювати тепло- та електрофізичні, а також поверхневі впливи неможливо без вакуумування досліджуваного обладнання. При цьому тепло- та електрофізичні впливи визначаються концентраціями газових частинок, а поверхневі — потоками частинок до поверхні або від неї.

Вплив космічних умов на матеріали й компоненти електронної апаратури

При вивченні параметрів космічних умов виділяють три групи середовищ: міжзоряне, міжпланетне, атмосфера планет (їх супутників) [3].

Міжзоряне середовище складається з міжзоряного газу та найдрібніших твердих частинок — пилу, які заповнюють простір між зірками в галактиках. Газ майже рівномірно перемішаний з пилом. Міжзоряне середовище поблизу Сонця переходить у міжпланетне.

Міжпланетне середовище заповнює простір між планетами Сонячної системи. Воно складається з речовини, що розширюється, сонячної корони. Середня концентрація газу (в основному, атомарного водню) у міжзоряних областях дорівнює $\sim 10^6 \text{ м}^{-3}$, а його температура близька до 10^2 К . Основне джерело речовини у міжпланетному космічному просторі — Сонце.

Сонце складається в основному з водню (~90%) та гелію (~9%). Газові частинки залишають сонячну корону зі швидкістю 300—800 км/с, створюючи стаціонарні потоки плазми — ”сонячний вітер“. Концентрація іонізованих атомів водню та гелію в сонячному вітрі поблизу Землі близько $5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, їх середня температура $2 \cdot 10^5 \text{ К}$ [19].

Фізичні умови в міжпланетному просторі досить широко варіюються в залежності від сонячної активності. У період її максимуму після появи на Сонці хромосферних сполохів середні швидкості частинок можуть зростати до $\sim 10^3 \text{ км/с}$, а їх концентрації — до $\sim 10^8 \text{ м}^{-3}$.

В результаті взаємодії частинок (“сонячний вітер”) з геомагнітним полем на відстані від поверхні землі, що дорівнює приблизно 10 земним радіусам, виникає ударна хвиля. Чітко відрізняються фронт хвилі, магнітопауза та область турбулентного руху плазми, що розташована між ними.

Атмосфера планет (їх супутників) може суттєво змінюватися в залежності від висоти. У табл. 2 наведено зміни параметрів атмосфери Землі, що відбуваються при збільшенні висоти над рівнем моря. Враховуючи дані табл. 2, слід відмітити, що температура характеризує лише кінетичну енергію частинок газу, яка не впливає безпосередньо на температуру відкритих поверхонь космічної електронної апаратури в силу більшої розрідженості середовища.

Атмосфера Землі й особливо її зовнішня частина — екзосфера знаходяться у безперервному русі та є змінними. Основною причиною цього є сонячна активність [19]. На відстані 200 км від поверхні Землі довжина вільного пробігу частинок газу дорівнює декілька десятків метрів.

Т а б л и ц я 2. Зміни параметрів атмосфери Землі в залежності від висоти [19]

T a b l e 2. Changes of parameters of the Earth's atmosphere on highness [19]

Висота, км	Тиск, Па	Густина, г/см ³	Температура, К	Концентрація частинок, см ⁻³	Характеристика вакууму
Рівень моря	$1,33 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	293	$2,7 \cdot 10^9$	—
200	$8,5 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-13}$	1200	$7,0 \cdot 10^9$	Глибокий
300	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-14}$	1500	$8,0 \cdot 10^8$	
500	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$3,0 \cdot 10^{-16}$	1600	$2,5 \cdot 10^7$	Дуже глибокий
1000	$4,0 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-18}$	1600	$1,5 \cdot 10^5$	
2000	$8,0 \cdot 10^{-10}$	$2,0 \cdot 10^{-19}$	1800	$2,0 \cdot 10^4$	
3000	$5,0 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-19}$	2000	$1,0 \cdot 10^4$	
5000	$4,0 \cdot 10^{-10}$	$4,0 \cdot 10^{-20}$	3000	$4,0 \cdot 10^3$	Надглибокий
10 000	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-20}$	15 000	$1,0 \cdot 10^3$	
20 000	$1,0 \cdot 10^{-10}$	$2,0 \cdot 10^{-21}$	50 000	$1,0 \cdot 10^2$	
30 000	$2,5 \cdot 10^{-11}$	$6,0 \cdot 10^{-22}$	$1 \cdot 10^5$	10	
50 000	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$2,5 \cdot 10^{-22}$	$2 \cdot 10^5$	3—4	

Отже, частина молекул та атомів, рухаючись в екзосфері на висоті близько 500 км, може мати швидкість, яка перевищує другу космічну, й без перешкод виходити за межі атмосфери планети. Подібне розсіювання газів у міжпланетному просторі називається дисипацією. Велика частина дисипатуючих газів приходить на водень та гелій [3]. За рахунок активності Сонця й явища дисипації склад та хімічний стан газів суттєво змінюються (рис. 1, а). Так, на висотах більших за декілька тисяч кілометрів частинки газів повністю іонізовані.

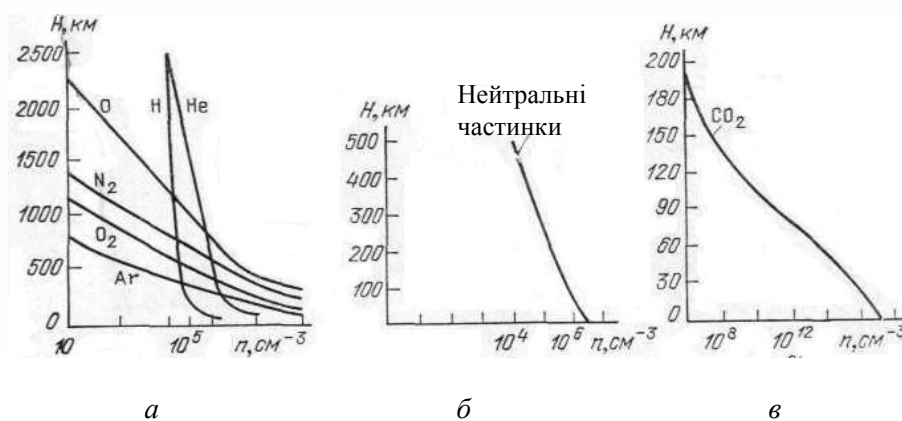


Рис. 1. Залежності концентрацій газів від висоти (відстань до поверхні) в атмосфері Землі (а), Місяця (б), Марса (в) [3]

Fig. 1. The dependences of the gases concentration on highness (distance to the surface) in the Earth's atmosphere (a), Moon (b), Mars (v) [3]

Дані, представлені в табл. 3, свідчать, що атмосфера Землі неоднорідна як за хімічним складом, так і за станом частинок (молекули, атоми або іони). На висотах ~60 км в атмосфері є лише нейтральні молекули. На більших висотах починається дисоціація молекул й збільшується концентрація електронів та іонів. На висоті понад декілька тисяч кілометрів газові частинки повністю іонізовані.

Для порівняння, *атмосфера Місяця* через досить невелику масу сильно розріджена. Тиск газу біля місячної поверхні складає $\sim 10^{-10}$ Па вночі й $\sim 10^{-8}$ Па вдень. При цьому концентрація газу у нічний час близька до $2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Основними компонентами атмосфери являються Ne, Ar, H_2 та He [19]. Виміряна концентрація Ne узгоджується з модельними уявленнями про сонячний вітер, як джерело атомів водню. Концентрація Ne також близька до розрахункових величин. Виміряна концентрація H_2 майже втричі перевищує очікувану. Джерелами атмосфери являються як внутрішні процеси (виділення газів з кори Місяця та вулканізм), так і зовнішні явища — падіння мікрометеоритів, сонячний вітер тощо. Усі гази, що виділилися, Місяць не здатен утримати, оскільки має слабку гравітацію, більша частина газів, що піднімаються з його поверхні, розсіюється в космосі [20]. Під дією сонячного вітру та ультрафіолетового сонячного випромінювання нейтральні атоми місячної атмосфери іонізуються, прискорюються у міжпланетному та місячному поверхневому електричних полях й впроваджуються у поверхню Місяця. Атмосфера Місяця містить всього близько 1 кг водню та 1 т ксенону [21].

Концентрація частинок у поверхні Місяця значно змінюється в залежності від місячної доби: вночі на 1 см^3 припадає 10^5 частинок, а вдень — 10^4 . Для Землі подібний показник складає приблизно $2,7 \cdot 10^{19}$ [22]. Основні компоненти атмосфери Місяця, маса якого майже в 81 раз менша за масу Землі, мають наступні концентрації (част./ см^3):

водень — $6,5 \cdot 10^4$; гелій — $4 \cdot 10^4$; неон — $8 \cdot 10^4$; аргон — $1,1 \cdot 10^4$ — $4 \cdot 10^4$.

Зміну сумарної концентрації нейтральних частинок в атмосфері Місяця наведено на рис. 1, б.

На поверхню навколосемного космічного апарата, яка обернена до Сонця, на 1 м^2 щосекунди надходить енергія близько 1400 Дж, що переноситься сонячним електромагнітним випромінюванням. Спектральний склад випромінювання Сонця наведений на рис. 2. Слід зауважити, що приблизно 9% енергії в спектрі випромінювання Сонця припадає на ультрафіолетове випромінювання, 46,1% — на інфрачервоне, інше — на рентгенівське та корпускулярне. В інфрачервоному та видимому діапазонах енергія окремих квантів мала для того, щоб випромінювання могло здійснювати фізико-хімічний вплив на речовину. В той же час ці випромінювання нагрівають елементи й матеріали відкритої частини електронної апаратури.

При зменшенні довжини хвилі λ енергія квантів випромінювання підвищується й може стати достатньою для розриву молекулярних зв'язків або появи радіаційних дефектів у речовинах. Однак зі зменшенням величини λ різко знижується й інтенсивність випромінювання (рис. 2). Тому інтегральний вплив випромінювання короткохвильової області спектра Сонця зменшується.

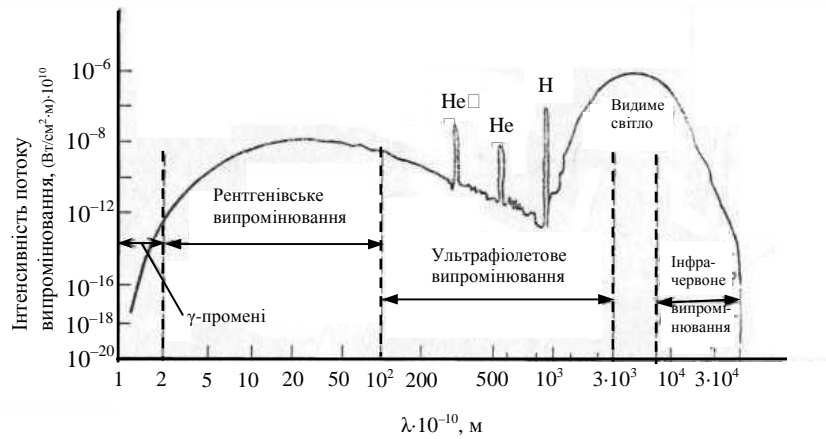


Рис. 2. Спектральний склад електромагнітного випромінювання Сонця [3]

Fig. 2. The spectral composition of solar electromagnetic radiation [3]

Земля, так же як й інші планети, надсилає на поверхню космічного апарата довгохвильове випромінювання (тепловий потік), що зумовлене частковим відбиттям сонячного випромінювання хмарами, атмосферою та поверхнею Землі, а також власним тепловим випромінюванням. На низьких орбітах густина цього теплового потоку може сягати 40% густини потоку прямого сонячного випромінювання, але зі збільшенням висоти густина зменшується.

Теплові потоки, які йдуть на космічний апарат від зірок, практично малі. Нарешті, енергія випромінювань ділянок міжзоряного простору, позбавлених будь-яких джерел, відповідає температурі 2,7—4 К. До такої температури могла б охолотитися поверхня космічного апарата й, відповідно, електронна апаратура, що знаходиться в ньому, при відсутності припливу тепла від зовнішніх або внутрішніх джерел.

Вакуум зовні та в середині космічного апарата

Тиск газу навколо космічного апарата швидко падає в ході його запуску з Землі та при виході на навколосезну орбіту. Умови високого вакууму встановлюються вже після ~3—5 хв космічного польоту. Це відбувається на висоті близько 150 км, де тиск газу складає $\sim 5,05 \cdot 10^{-4}$ Па. При цьому середня довжина вільного пробігу частинок газу орієнтовно в 5—10 разів перевершує характерний лінійний розмір космічних апаратів. При таких умовах високого вакууму, в яких майже виключено зіткнення частинок, якщо на космічному апараті є негерметичні відсіки, то часу буде не вистачати для того, щоби тиски зсередини й зовні відсіків вирівнялися. Це може спричинити низку проблем, наприклад, з електроустаткуванням [23]. Подібна нерівність тисків виникає й при вході в щільні шари атмосфери планети, але зі зворотнім знаком.

Отже, у космічному польоті вакуумне середовище навкруги космічного апарата визначається у загальному випадку характеристиками планетарної атмосфери або міжпланетного простору, а також

характеристиками штучної атмосфери, яка утворюється при газовиділенні матеріалів космічного апарата та зовнішнього обладнання (газовиділення двигунів, витік газу з кабін, викиди відходів у випадку пілотованих апаратів тощо).

В ході польоту космічного апарата концентрація частинок газу біля його передньої (в напрямку руху) та задньої частин також різна. Біля передньої частини спостерігається зона згущення (а звідси й підвищення газового тиску), яка утворюється в результаті змітання газових частинок передньою (лобовою) поверхнею космічного апарата, що летить. До співудару з цією поверхнею вони мали лише так звану "теплову швидкість", тобто меншу, ніж орбітальна швидкість космічного апарата.

В загальному випадку максимальний тиск частинок газу на лобову частину космічного апарата може на порядок перевищувати значення, що характерне для даного середовища у певній точці космічного простору, а тиск на хвостову частину — на декілька порядків нижчий за це значення. В зоні згущення містяться частинки природного середовища, а також частинки від газовиділення матеріалів космічного апарата і т. п., в той час як біля задньої частини космічного апарата знаходяться головним чином частинки цих газовиділень та інші складові власної (штучної) атмосфери космічного апарата. Зазвичай тиск газової атмосфери на поверхню космічного апарата повільно змінюється від зони згущення до зони розрідження (позаду космічного апарата). Власна атмосфера космічного апарата створює тиск на його задню частину не більше 10^{-8} Па.

Під час польоту пілотованого космічного апарата на низьких орбітах на його поверхні з'являється мономолекулярний шар впродовж декількох секунд. Для непілотованих космічних апаратів швидкість газовиділення, а отже, й утворення (конденсації) такого шару в 200 разів менша. Природно, що концентрація частинок газовиділення зменшується зі збільшенням відстані від поверхні космічного апарата, однак це зменшення різне для різних висот орбіт. Так, наприклад, початкова концентрація таких частинок зменшується на порядок вже на відстані 0,1 м від поверхні космічного апарата при висоті навколосемної орбіти ~100 км й на відстані 2 м — при висоті орбіти 500 км [23].

Вплив глибокого вакууму на вузли та блоки бортового обладнання

У космічних умовах фактори діють на фоні глибокого вакууму, що прискорює протікання процесів й призводить до низки специфічних явищ. Глибокий вакуум здатен до поглинання необмеженої кількості газів й парів, що можуть виділятися з електронної апаратури у космосі. У космічному вакуумі будь-який матеріал виділяє газ й пару, домішки й добавки, що адсорбовані на поверхні та абсорбовані в об'ємі матеріалу. В останньому випадку процесу газовиділення передують дифузія атомів та молекул до поверхні.

Космічний вакуум може викликати сублімацію поверхневих шарів матеріалів обладнання. Для матеріалів відкритих поверхонь апаратури, що знаходиться у космічному вакуумі, потрібно підбирати матеріали з низькою швидкістю сублімації M_c . Наприклад, товщина пластини з кадмію або цинку зменшується в рік за рахунок сублімації на 0,1 мм при

температурі поверхні, що сублимується, $T_c = 100\text{—}150\text{ }^\circ\text{C}$. Для того щоб отримати подібне зменшення товщини пластини (з алюмінію, германію, кремнію, міді, нікелю тощо), її вже потрібно нагріти до $750\text{—}1000\text{ }^\circ\text{C}$, тому що ці метали досить стійкі до сублимації [3].

В результаті газовиділення й втрат швидколетючих компонентів складних сполук при тривалому перебуванні в умовах розрідженого середовища можуть змінюватися теплофізичні та діелектричні характеристики матеріалів електронної апаратури (теплопровідність, електрична провідність тощо). Видалення захисних газових та оксидних плівок, а також сублимація поверхневих шарів, які мають товщину, що кратна декільком довжинам хвиль випромінювання, будуть змінювати шорсткість поверхні й, як наслідок, їх оптичні характеристики. Спільна дія глибокого вакууму та ультрафіолетового випромінювання викликає ефект “відбілювання”, завдяки чому зростає відбивна здатність поверхні та полегшуються умови охолодження апаратури.

В глибокому вакуумі майже відсутній конвективний теплообмін і теплопровідність середовища, а обмін тепла з космічним середовищем може відбуватися лише за рахунок випромінювання. Крім того, через мікронерівності поверхні й вакуумні проміжки між ними утруднена передача тепла крізь поверхні частин електронної апаратури, що стикаються.

В космічних умовах при глибокому вакуумі бувають такі ситуації, при яких поверхні твердих тіл стають досить чистими (майже до атомно-чистих, коли на 1000 атомів основної речовини припадає 1 атом забруднення). Це призводить до посилення адгезії матеріалів, що стикаються, а при наявності пластичних деформацій, наприклад при терті, можуть виникати явища холодного зварювання в точках контакту.

Вплив факторів космічного простору на конструкційні матеріали та елементи електронної апаратури відбувається на фоні визначаючого фактора, яким є тиск глибокого космічного вакууму, що обумовлений значною розрідженістю середовища. Глибокий вакуум характеризується довжиною вільного пробігу молекул газу l , яка співрозмірна з характеристичними лінійними розмірами космічного апарата або досліджувальної вакуумної камери [3].

Завдяки екстремально низькій концентрації речовини космічний простір здатен “поглинати” необмежену кількість газів й парів, які можуть виділятися з космічних апаратів. Тому підвищені втрати маси в результаті десорбції, випаровування та сублимації матеріалів є найбільш характерним наслідком впливу космічного вакууму на матеріали та елементи діючої у космосі апаратури. Особливість втрати маси у космосі полягає в тому, що на поверхню космічного апарата повертається досить незначна частина газових частинок, які летять з нього. Ця особливість кількісно характеризується коефіцієнтом повернення Z , який дорівнює відношенню числа частинок, що повернулися до поверхні космічного апарата, до числа частинок, які випарувалися з неї [19]. Сублимація призводить також до суттєвих змін структури й властивостей поверхні конструкційних матеріалів космічних апаратів та їх покриттів.

Поверхневі напруги, забруднення, технічна передісторія та інші погано контрольовані фактори можуть змінювати характер й величину

втрат маси. Тому розрахункові оцінки таких втрат на основі відомих моделей дають лише наближене уявлення про реальні процеси в космосі. З цієї причини велике значення набуває вивчення таких процесів у наземних установках в умовах, які імітують або моделюють космічні.

У космічному просторі на матеріали також інтенсивно впливають електромагнітні та корпускулярні випромінювання. Спільний вплив космічного вакууму та випромінювання, як правило, підсилює ефекти втрати маси. Це особливо характерне для матеріалів, які ефективно поглинають променисті потоки, наприклад, терморегулюючих покриттів на основі Fe_2O_3 та ZnO , що поглинають ультрафіолетове випромінювання.

Під впливом космічного вакууму виникають також й інші специфічні поверхневі явища. Це, перш за все, збільшення адгезії та когезії й, як наслідок, погіршення характеристик тертя та зносу, зміна оптичних властивостей та шорсткості поверхні, зміна коефіцієнтів акомодатії теплової енергії при взаємодії газу з поверхнею, розпилення поверхні набігаючими потоками іонів та нейтральних частинок та інш.

Космічний вакуум помітно змінює також хід тепло- та електрофізичних процесів. У космічному вакуумі практично відсутні конвективна теплопередача і теплопровідність газу. Теплопровідність повітря при тискові 10^{-2} Па, наприклад, складає лише ~1% від його теплопровідності при атмосферному тискові. В умовах космічного вакууму до того ж утруднений теплообмін шляхом теплопровідності через стики статично дотичних між собою частин апаратури внаслідок вакуумних проміжків, що утворюються між мікронерівностями контактних поверхонь. Тому теплообмін у космосі здійснюється переважно променистими потоками. Космічний вакуум представляє собою природний захист від пробоїв і розрядів в електричних мережах. Разом з тим інтенсивні втрати маси бортових наукових приладів у космічному вакуумі можуть призвести, принаймні короткочасно, до створення вакуумних умов, що сприяють розвитку електричних пробоїв та розрядів у парах і газах, збільшенню поверхневих струмів витоку й, як наслідок, до порушення нормального функціонування та навіть ушкодження електричних мереж бортових приладів. Такими ж наслідками загрожує пере конденсація металічних плівок на електричних комутаційних пристроях. В умовах космічного вакууму збільшується небезпека деяких несприятливих факторів — витоку газів та парів із замкнутих порожнин, зниження фізико-механічних характеристик матеріалів.

Розглянемо більш детально фізичні особливості основних з перерахованих видів впливу космічного вакууму на матеріали та конструкції.

Втрати маси

Газовиділення притаманне будь-якій речовині або матеріалу, що розташований у вакуумі. Цим терміном на практиці позначається декілька фізичних процесів, що одночасно протікають в реальних тілах: десорбція атмосферного газу, який адсорбований поверхнею бортового обладнання;

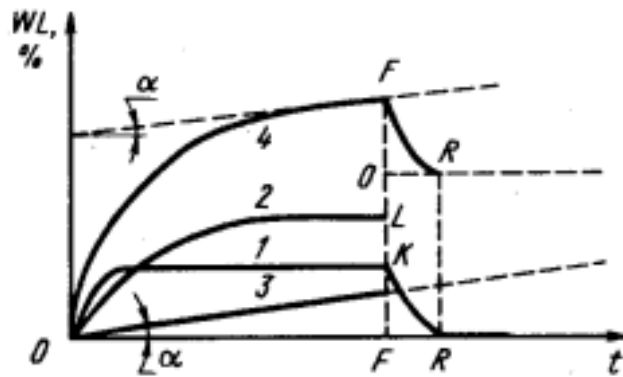


Рис. 3. Кінетика втрат маси матеріалів у космічному вакуумі: 1 — атмосферних газів, що сорбовані матеріалом; 2 — забруднень й (або) добавок; 3 — втрати в результаті випаровування (сублімації); 4 — сумарні втрати маси зразка; F — завершення експозиції у вакуумі; R — часткове відновлення маси зразка [19]

Fig. 3. Kinetics of weight losses for materials in the space vacuum: 1 — loss of the atmospheric gases which sorbed by material; 2 — loss of the impurities and (or) additions; 3 — loss through evaporation (sublimation); 4 — total mass loss of the sample; F — complete exposure in a vacuum; R — partial recovery of mass of the sample [19]

дифузія та десорбція газу, який адсорбований твердими стінками апаратури; дифузійний перенос газу через тонкі стінки бортового обладнання та його подальша десорбція; випаровування (сублімація) рідини (твердого тіла) (рис. 3).

Адгезія, тертя, знос, мастильні матеріали

У космічному вакуумі в результаті випаровування поверхневих забруднень поверхні твердих тіл стають досить чистими, аж до атомно-чистих, як умовно називають поверхні, в яких на 1000 атомів основної речовини зустрічається один домішковий атом. Це стає можливим, наприклад, якщо газові молекули десорбуються, а оксидні плівки механічно руйнуються та видаляються при фрикційній взаємодії або при безпосередньому контактуванні твердих тіл. Також очищенню сприяють підвищені температури в зоні контакту через погіршення умов охолодження у вакуумі, а також космічного випромінювання. Відновлення захисних плівок на поверхні утруднено через низький окиснювальний потенціал космічного середовища.

В результаті зростає адгезія (когезія) речовин та матеріалів бортового обладнання. Крім того, в шарнірах та інших вузлах можуть виникати явища заклинювання і навіть “холодного” зварювання в точках контакту.

Т а б л и ц я 3. Адгезійна здатність контактних пар у надвисокому вакуумі ($p \approx 10^{-9}$ Па) [19]

T a b l e 3. Adhesion ability of contact couples in ultra-high vacuum ($p \approx 10^{-9}$ Pa) [19]

Адгезійна здатність	
Висока	Низька
Fe—Al	Cu—Mo
Cu—Ag	Ag—Mo
Ni—Mo	Ag—Fe
Ni—Ni	Ag—Ni
	Ge—Ge
	Ta—Cu
	W—Cu
	Al ₂ O ₃ (сапфір)—сталь

Схильність до "холодного" зварювання найбільш сильно виражена в тих матеріалах, які здатні, принаймні, до часткового утворення твердих розчинів або сплавів. До них відносяться, наприклад, метали з кубічною кристалічною ґраткою. У взаємно нерозчинних металах адгезійні взаємодії проявляються значно слабше (табл. 3).

При адгезії в результаті міжмолекулярної взаємодії виникає зв'язок між поверхневими шарами двох різнорідних твердих тіл, коли вони торкаються одне одного. Адгезія значно посилюється при повному контакті по всій площі зіткнення, й саме це пояснює "холодне" зварювання металів [19, 23].

На адгезію у вакуумі сильний вплив здійснює адсорбція залишкових газів на контактних поверхнях, оскільки адсорбційні плівки зменшують ефективність сил поверхневої взаємодії (табл. 4). Як свідчать дані, наведені в табл. 4, найбільше адгезійну взаємодію, наприклад, для алюмінію послаблює кисень, а для міді — повітря та етилен.

Адгезія контактних матеріалів здійснює визначаючий вплив на працездатність "відкритих" вузлів тертя у вакуумі. В атмосферних умовах поверхневі плівки, зокрема оксидні, утворюються досить швидко й зменшують кількість та міцність адгезійних містків зв'язку, тим самим знижуючи коефіцієнт тертя f . На відміну від цього, в умовах космічного вакууму поверхневі плівки відновлюються повільно. Як видно на рис. 4, час, який необхідний для відновлення таких плівок при тискові менше 10^{-8} Па, може досягати десятків днів. Тому сили тертя і знос деталей, що знаходяться у рухливому контакті, мають при певних (критичних) параметрах оточуючого середовища екстремальні значення, які виключають можливість нормальної експлуатації механізмів.

Т а б л и ц я 4. Витримка*, що необхідна для зменшення вдвічі адгезійного зв'язку ряду металів, виражена в одиницях $\lg(\rho\Delta t)$ [19]

Table 4. The exposition* which is necessary for halving adhesive joint of some metals expressed in units $\lg(\rho\Delta t)$ [19]

Метал (чистота, %)	Газ					
	Повітря	Ar	C ₂ H ₄	H ₂	N ₂	O ₂
Al (99.99)	-1*	6	0	5	3	-2,2
Cu (99.99)	-2,9	3	-0,6	3	3	5
Mg (99.99)	-1	3	0	2	-	-1
Pb (99.99)	3	6	-	6	4	4
Ti (99)	-2	2	6,5	-1,7	-	-2

* Виражена в одиницях $\lg(\rho\Delta t)$

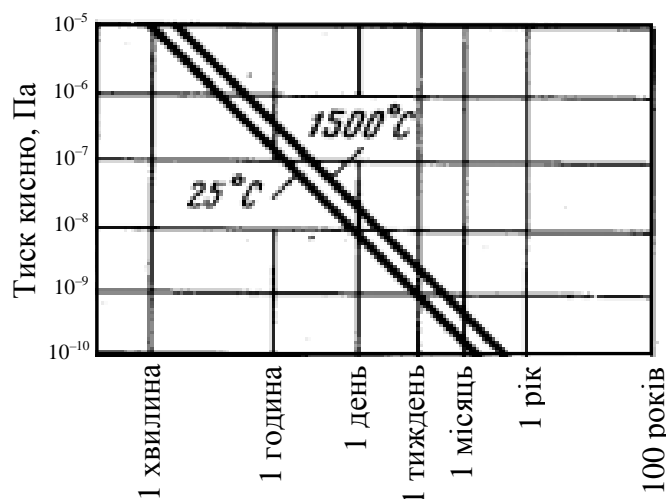


Рис. 4. Розрахункова тривалість утворення поверхневої оксидної плівки FeO товщиною 0,1 нм в залежності від тиску кисню [19]

Fig. 4. The estimated duration of the formation of oxide film FeO (thickness ~0.1 nm) depending on the oxygen pressure [19]

Критичним параметрам середовища відповідають швидкості руйнування й відновлення на поверхні оксидних і газових плівок. Враховуючи, що перший з цих процесів залежить від конструкторсько-технологічних рішень й експлуатаційних режимів вузлів тертя (швидкості, навантаження та інш.), то й підсумковий критичний параметр також буде залежити від цих режимів. Ця обставина ілюструється рис. 5, де показана типова залежність коефіцієнта f від тиску газового середовища, що оточує пару тертя. Видно, що критична область розташована в інтервалі 10^{-6} — 10^{-7} Па.

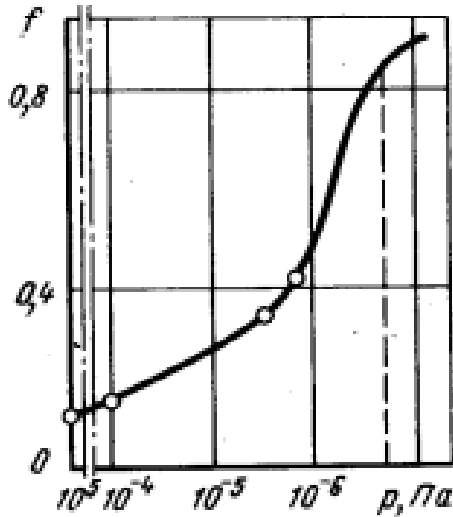


Рис. 5. Залежність коефіцієнта тертя ковзання алмазу по алмазу від тиску оточуючого газового середовища [19]

Fig. 5. Dependence of friction coefficient (diamond to diamond) on the pressure of the surrounding gas environment [19]

Дещо інша залежність спостерігається в “закритих” вузлах тертя, де формується локальна парогазова “атмосфера”. Зазвичай це спритно відбивається

на працездатності пар тертя й підшипникових вузлів. Для запобігання небезпечного росту коефіцієнта тертя в умовах космічного вакууму широко використовуються різноманітні мастильні матеріали. Частіше за все застосовують “сухі” мастильні матеріали на основі MoS_2 , металевих плівок і т. п., іноді також рідкі та консистентні мастильні матеріали.

Електрофізичні явища в умовах космічного вакууму

Космічний вакуум сприяє розвитку електричних розрядів і пробойів, виникненню й збільшенню струмів витоку та інших небажаних електрофізичних явищ в електронному та електротехнічному обладнанні космічної апаратури. До зростання струмів витоку призводить пере конденсація речовин, що легко випаровуються, матеріалів і адсорбованих плівок на більш холодних ділянках неізольованих електричних ланцюгів. Зниження електричної міцності розрядних проміжків в умовах космічного вакууму пояснюється збільшенням рухливості й швидким зростанням концентрації вільних носіїв струму — електронів та газових іонів. Ці явища, у свою чергу, викликані зміною тиску газу в області розрядних проміжків на різних ділянках траєкторій космічних апаратів та взаємодією космічних випромінювань — електронів, протонів, квантів електромагнітного випромінювання.

Здатність до розмноження носіїв струму в газовому проміжку визначається, як відомо, формулою Таунсенда [19]

$$I = I_0 \exp \varepsilon V,$$

де I , I_0 — поточне і початкове значення електричного струму в газовому проміжку з характерним об’ємом V ; ε — напруженість поля в цьому проміжку. Якщо носії струму утворюються швидше, ніж вони зникають, то газ у міжелектродному проміжку стає електропровідним. В іншому випадку рішачою роль у розвитку розряду відіграють іонізаційні явища на електродах.

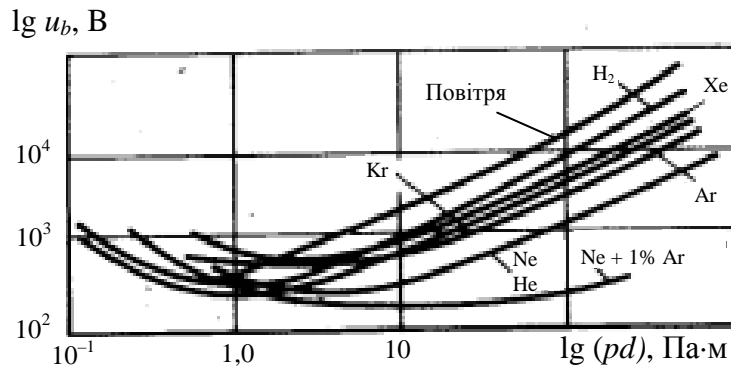


Рис. 6. Залежність напруження пробою u_b від добутку ρd [19].

Fig. 6. The dependence of the breakdown voltage u_b on the multiplication ρd [19].

Електрична міцність газових проміжків зазвичай графічно відображається кривими Пашена, які визначають напруження пробою електричного проміжку в залежності від добутку тиску газу ρ й міжелектронної відстані d (рис. 6). Хід пашенівських кривих сильно залежить від роду газу, форми, матеріалу та стану поверхні електрода. Якщо тиск знижується до рівня, який приблизно відповідає мінімуму пашенівської кривої, а в розрядних проміжках в цей момент є висока напруга, то в них можуть виникати пробої й розряди, що шкідливі для роботи апаратури в цілому.

Зміна фізико-механічних та електрофізичних властивостей і характеристик

Під впливом космічного вакууму можуть видозмінюватися зовнішні або внутрішні поверхні розділу матеріалів бортової апаратури, в результаті чого змінюються й механічні властивості матеріалів. Це може бути наслідком появи або розвитку мікроскопічних поверхневих тріщин, а також і інтеркристалітної корозії. Видалення в космічному вакуумі оксидних і поверхневих захисних плівок особливо відчутно впливає на властивості тих областей матеріалів і деталей, в яких існують значні механічні напруження. Внаслідок зміни властивостей поверхневих шарів можуть змінюватися також міцність та інші об'ємно-механічні характеристики матеріалів.

При видаленні в умовах космічного вакууму газових і оксидних плівок та сублімації поверхневих шарів змінюється шорсткість поверхонь та, як наслідок, їх оптичні характеристики, зокрема коефіцієнти поглинання сонячного випромінювання, акомодатії теплової енергії тощо. В результаті газовиділення й втрат (або осадження) легколетючих компонентів при тривалому перебуванні у космічному вакуумі можуть змінюватися й інші властивості матеріалів. Наприклад, на поверхнях діелектриків можуть накопичуватися електричні заряди, які

призводитимуть до появи поверхневих струмів витоку й навіть пробоям. Умови розповсюдження височастотних електромагнітних сигналів вздовж поверхні провідника (скін-ефект) у космічному вакуумі також змінюються.

Треба зазначити, метали досить стійкі в умовах космічного вакууму, за виключенням звичайно найбільш летючих, наприклад Cd або Zn. Такі метали легко сублімуються при температурах вищих за 100 й 150 °C відповідно та можуть утворювати електропровідні осади на ізоляторах або непрозорі осади на оптичних частинах обладнання. Товсті й однорідні оксидні шари на металах зазвичай зменшують їх сублімацію.

Усі метали, що знаходяться у космічному вакуумі в контакті між собою, схильні до “холодного” зварювання. При механічному ковзанні та деяких інших процесах, що супроводжуються видаленням оксидних шарів, це явище посилюється.

Температура

Об'єкти в просторі, в тому числі обладнання та космонавти, потрапляють під екстремальні перепади температур. Наприклад, на МКС фіксується величезне різномаяття температур в різних місцях станції і ці температури постійно змінюються. Є багато факторів, відповідальних за це при різних температурах. Найбільш значущими чинниками, є те, що МКС складається з безлічі різних матеріалів, а також постійно рухається між сонячним світлом і тінню. Насправді, МКС обертається навколо Землі, кожні 90 хв змінюючи режими з день на “ніч” на орбіті.

Температурні режими, що впливають на об'єкти в космосі, часто досить екстремальні в порівнянні з тими, при яких вони випробовувалися на Землі. Наприклад, громіздкі білі скафандри НАСА, які надівають астронавти при виході у відкритий космос, можуть мати різницю температур до 135 °C (275 °F) від однієї сторони до іншої. Це може статися, якщо астронавт обернений однією стороною проти сонця, а іншим боком звернений у глибокий вакуум.

Зазвичай існують три основні типи теплообміну: випромінювання, конвекція і провідність. Радіація є єдиним методом теплопередачі для об'єктів, що перебувають у вакуумі, такі фізичні характеристики космічного обладнання (зокрема, його оптичні властивості) будуть сильно впливати на його температуру. Тут йдеться про такі властивості матеріалу, як здатність його поверхні поглинати сонячне світло α або здатність матеріалу пасивно відхиляти енергію, випускаючи випромінювання в інфрачервоному діапазоні ϵ .

Таким чином, оптичний коефіцієнт α/ϵ досить важливий параметр при виборі матеріалів для роботи в умовах космосу. У той час як метали зазвичай мають відносно низьку α , мають набагато більш низький ϵ , створюючи сприятливе відношення α/ϵ . Зважаючи на те, що в деяких випадках зовнішні частини обладнання можуть витримувати перепади понад 260 °C, метали за межами МКС та інших космічних апаратів повинні мати спеціальні покриття на них. Ці застережливі заходи, як правило, сприяють витримуванню “сенсорних температур” від 120 °C до -129 °C. Наприклад, прозора тефлонова стрічка іноді застосовується на

поверхні металу для того, щоб збільшити його вкрай низьку ϵ , зберігаючи при цьому відносно низьку α металу [24].

Особливості процесів паяння в умовах мікрогравітації

Використання космічного вакууму в різних процесах космічної технології, а також при проведенні різноманітних робіт та експериментів на борту космічного апарата має великий науковий та практичний інтерес. Подібні роботи потребують одночасного впливу мікрогравітації й високого або надвисокого вакууму.

Так, проведені раніше експерименти по паянню [25] показали, що в умовах мікрогравітації ніяких змін в металі на атомному рівні (дифузія, поверхневий натяг, хімічна реакція) не відбувається. Зміни проявляються на макроскопічному рівні (масо- й теплоперенесення, механізми росту кристалів тощо).

В умовах невагомості (літаюча космічна лабораторія) встановлено, що на протигагу наземним умовам зазори стиків заповнюються рідким припоєм рівномірно, без провісання; змочування матеріалу, який паяється, рідким припоєм і розтікання останнього по поверхні основного матеріалу відбувається під дією капілярних сил зчеплення: диспергуючі частинки основного матеріалу в розплаві припою розподіляються рівномірно, по об'єму й у шві відмічається схильність до дрібнозернистої будови. Отже, за допомогою паяння можливе утворення якісних стикових, нахлесних з'єднань та скручувань провідників, проведення ремонту отворів шляхом припаювання латок. Паяння в космосі відрізняється від паяння на Землі відсутністю щільності у припою внаслідок мізерно малого прискорення, відсутності конвекції в шві в результаті дуже низького залишкового тиску, а також прагнення рідкого припою до сферичної форми.

Основним джерелом теплоти при паянні в космосі є сонячна енергія (потужність 1,7—2 кВт). На висоті 100 км залишковий тиск в оточуючому просторі складає $1,33 \cdot (10^{-4}—10^{-5})$ Па.

У паяних швах відсутні гелій, водень, атомарний азот, кисень. Радіус галтельної ділянки паяного шва зменшується: припій приймає форму краплі з приплюснутою вершиною. Паяння в космосі потребує мінімальних зазорів, у паяних з'єднаннях спостерігається менше дефектів, що спричинені усадкою сплавів; шви менш окиснені [25].

Висновки

Як свідчить практика наукових досліджень, можна виділити три основних способи використання космічного вакууму:

- “насос” для відкачування речовини з бортової вакуумної камери;
- допоміжний “насос” для попереднього відкачування з наступним застосуванням автономних насосів для створення високого та надвисокого вакууму;
- “насос”, який забезпечений спеціальним захисним пристроєм (або просто — захистом), що перешкоджає “контакту” з космічним вакуумом, який має гірші характеристики (наприклад, в зоні згущення біля лобової поверхні космічного апарата).

Використання космічного вакууму потребує застосування спеціальних методів та технологій, здатних працювати при певній глибині вакууму та швидкості газовиділення бортових установок або навіть корегувати їх [23].

У роботі [26] розглянуто та проаналізовано поняття "вакуумної інженерії", як експериментального методу, який за певних умов дозволяє корегувати властивості вакууму. Саме поняття вперше було запропоноване лауреатом Нобелівської премії Т. Д. Lee [27], який зазначав: концепція вакуумної інженерії базується на визнанні того, що вакуум характеризується параметрами та структурою, які не залишатимуть сумнівів в тому, що він є енергетичним й структурним середовищем і може розглядатися як в контексті квантової теорії, так і в контексті загальної теорії відносності.

РЕЗЮМЕ. Представлен общий обзор литературы, касающийся основных параметров космического вакуума и его влияния на материалы и компоненты аппаратуры, которые работают в космической среде. Особое внимание уделено эксплуатационным свойствам воздействия глубокого вакуума на характеристики неразъемных соединений конструкций бортовой и научной аппаратуры. В частности, рассмотрены вопросы изменения механических, теплофизических и оптических свойств, процессов адгезии, трения, пайки, потери массы и т. д.

Ключевые слова: космический вакуум, адгезия, пайка, неразъемные соединения.

1. *Гришин С. Д.* Космическая технология и производство / С. Д. Гришин, Л. В. Лесков, В. В. Савичев // Знание: Космонавтика, астрономия. — 1978. — 4. — 28 с.
2. *Швец В. И.* Разработка припоя и технологии пайки для построения ферменных конструкций в космическом пространстве: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — К., 1998. — 26 с.
3. *Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование: (Учеб. пособие)* Под ред. А. И. Коробова. — М.: Радио и связь, 1987. — 272 с.
4. *Данилов А.* "Неземная" технология // Техника молодежи. — 1974. — № 4. — С. 44.
5. *Рубаков В.* К открытию бозона Хиггса // Квант. — 2012. — № 5—6. — С. 2—10.
6. *Puthoff H. E.* Can the vacuum be engineered for space light applications? Overview of theory and experiments // J. of Sci. Exploration. — 1998. — 12, No. 1. — P. 295—302.
7. *Оганян Х.* Что такое спин? // Физика за рубежом. Сер. Б. — М.: Мир, 1988. — 68 с.
8. *Belinfante F. J.* On the spin angular momentum of mesons // Physica. — 1939. — 6, No. 9. — P. 887.
9. *Riess A. G.* Observation evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant / [A. G. Riess, A. V. Filippenko, P. Challis et al.] // The Astronomical J. — 1998. — 116. — P. 1009—1038.
10. *Окунь Л. Б.* Физика элементарных частиц. — М.: Наука, 1988. — 272 с.
11. *Weinberg S.* The cosmological constant problem // Rev. Mod. Phys. — 1989. — 61. — P. 1—23.

12. Вакуум // Федеральное космическое агентство (словарь космических терминов). — <http://www.federalspace.ru/1285>
13. *Акимов А. Е.* Торсионные поля и их экспериментальные проявления / А. Е. Акимов, Г. И. Шипов. — М. : Междунар. ин-т теор. и прикл. физики, 1995. — 32 с.
14. *Гриб А. А.* Вакуумные квантовые эффекты в сильных полях / А. А. Гриб, С. Г. Мамаев, В. М. Мостепаненко. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 288 с.
15. *Чернин А. Д.* Физический вакуум и космическая антигравитация (монография). — <http://www.scorcher.ru/art/theory/chernin/vakuum.htm>
16. *Чернин А. Д.* Космический вакуум // Успехи физ. наук. — 2001. — **171**, № 11. — С. 1153—1175.
17. *Старобинский А. А.* Спектр реликтового гравитационного излучения и начальное состояние Вселенной // Письма в ЖЭТФ. — 1979. — **30**, № 11. — С. 719—723.
18. *Velan A. K.* Vacuum of space // The Multi-Universe Cosmos. — 1992. — P. 161—178.
19. *Нусинов М. Д.* Влияние космического вакуума на материалы и устройства научной аппаратуры. — М. : Машиностроение, 1987. — 48 с.
20. *Родионова Ж. Ф.* Луна // <http://selena.sai.msu.ru/Home/SolarSystem/-moon/moon.htm>
21. *Атмосфера Луны* // Астрономическая энциклопедия <http://astrogalaxy1.narod.ru/astro026.html>
22. *Солнечная система* / Под ред.-сост. В. Г. Сурдина. — М. : Физматлит, 2008. — С. 95.
23. *Нусинов М. Д.* Космический вакуум и надежность космической техники. — М. : Знание, 1986. — 64 с.
24. *Thermal Vacuum* // http://www.hq.nasa.gov/office/scap/docs/-SCAP_THERMALVAC_A_112508_508.pdf
25. *Пайка: совместимость металла и припоя (Ч. 4)* // http://metallischekiy-portal.ru/articles/svarka/paika/sovместимost_metalla_i_pripoa/4
26. *Puthoff H. E.* Advanced space propulsion based on vacuum (spacetime metric) engineering // J. of the British Interplanetary Soci. — 2010. — **63**. — P. 82—89.
27. *Lee T. D.* Particle Physics and Introduction to Field Theory. — London: Harwood Academic Press Publishers, 1988. — 825 p.

Надійшла 22.11.14

Sydorenko T. V.

Space vacuum and its effects on materials, construction and characteristics of joints (review)

Review of the overall information about the basic parameters of space vacuum and its effects on materials and components of space devices was presented. Emphasis was paid to the operational properties of high-vacuum effects on the characteristics of joints of board and scientific equipment, in particular, questions of changes the mechanical, thermal and optical properties, the processes of adhesion, friction, brazing, etc.

Keywords: *space vacuum, adhesion, brazing, joints.*