

<https://doi.org/10.15407/knit2023.03.057>
УДК 621.791:629.78

Л. М. ЛОБАНОВ, заст. директора, д-р техн. наук, проф., акад. НАН України.
Заслужений діяч науки і техніки України (2004), Золота медаль ім. Б. Патона «За видатні досягнення
у створенні інноваційних науково-технічних розробок, які знайшли широке практичне використання» (2022)
ORCID: 0000-0001-9296-2335

E-mail: office@paton.kiev.ua

О. С. МІЛЕНІН, старш. дослідник, д-р техн. наук, пров. наук. співроб.

Член Американського співтовариства інженерів механіків

ORCID: 0000-0002-9465-7710

E-mail: asmilenin@ukr.net

Є. Г. ТЕРНОВИЙ, заст. зав. відділу «Космічні технології»

ORCID: 0000-0002-4323-0944

E-mail: ev-geo@ukr.net

Н. В. ПІСКУН, зав. відділу «Космічні технології», д-р техн. наук,

ORCID: 0000-0003-1459-2310

E-mail: nadamova54@gmail.com

С. О. ГЛУШАК, наук. співроб.

ORCID: 0000-0003-4518-7262

E-mail: electriber@ukr.net

І. І. СТАТКЕВИЧ, наук. співроб.

ORCID: 0000-0001-9403-2123

E-mail: statkevich_igor@ukr.net

Л. М. РАДЧЕНКО, пров. інж.

ORCID: 0000-0002-4235-2413

E-mail: rleonid190@gmail.com

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України
вул. Казимира Малевича 11, Київ, Україна, 03150

ЗАКОНОМІРНОСТІ ПОРОУТВОРЕННЯ ПРИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОМУ ЗВАРЮВАННІ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ В УМОВАХ ЗНИЖЕНОЇ ГРАВІТАЦІЇ

Використання зварювальних процесів у космосі необхідне насамперед для виготовлення, монтажу та ремонту великогабаритних конструкцій космічних станцій як на навколосезній орбіті, так і при освоєнні Місяця, де планується створювати довготривалі місячні бази, а також інші об'єкти, що забезпечуватимуть життєдіяльність і роботу експедицій. Це можуть бути монтажно-складальні операції при створенні герметичних споруд для житлових і виробничих приміщень, а

Цитування: Лобанов Л. М., Міленін О. С., Терновий Є. Г., Піскун Н. В., Глушак С. О., Статкевич І. І., Радченко Л. М. Закономірності пороутворення при електронно-променевому зварюванні алюмінієвих сплавів в умовах зниженої гравітації. *Космічна наука і технологія*. 2023. № 3 (142). С. 57–66. <https://doi.org/10.15407/knit2023.03.057>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

також споруди для зберігання енергоресурсів, трубопроводи космічних комплексів, або ремонтно-профілактичні роботи, пов'язані із забезпеченням тривалості експлуатації діючих систем.

Електронно-променеве зварювання (ЕПЗ) є оптимальним і найбільш технологічним процесом для виконання цих робіт порівняно з іншими способами зварювання. Глибокий вакуум та низькі температури, які є природним середовищем у космічних умовах, сприяють використанню електронно-променевих технологій, зокрема і зварювальних. При цьому процесі ефективний ККД становить 85...90 %, що є максимальним серед інших способів зварювання. Процес ЕПЗ в умовах земної гравітації дозволяє забезпечити механічні та хімічні властивості, а також вакуумну щільність зварних з'єднань на рівні основного металу конструкції.

При виконанні ЕПЗ в умовах надвисокого вакууму, зниженої гравітації та низьких температур цей процес ускладнюється, тому якість зварних з'єднань може знизитися. Результати експериментів, проведених в умовах зниженої гравітації та низьких температур у космосі, а також на літаючій лабораторії, показали підвищену кількість пор у зварних швах. Це, у першу чергу, виявилось при зварюванні зразків із алюмінієвих сплавів, які широко використовуються для створення конструкцій космічного призначення, що не виключає можливості їхнього використання при виготовленні зварних конструкцій на поверхні Місяця.

Метою даної роботи є дослідження закономірностей утворення пор у металі шва зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів при ЕПЗ в умовах зниженої гравітації шляхом якісного аналізу основних факторів, які визначають підвищену щільність до утворення несущільностей такого типу.

Ключові слова: електронно-променеве зварювання, алюмінієві сплави, зварні з'єднання, надвисокий вакуум, знижена гравітація, пороутворення, парогазовий канал, пухирці газу, несущільності, схлопування, баланс сил, гідродинаміка, абляційний тиск, числа Рейнольдса, гідростатичний баланс, траєкторія газового пухирця, результати експериментів.

Особливі фізичні умови на поверхні Місяця та у відкритому космосі ускладнюють проведення технологічних процесів і вимагають створення спеціалізованого обладнання та надійних технологій для виконання зварювальних робіт [10]. Але такі фактори, як знижена гравітація, надвисокий вакуум та низька температура, ускладнюють одержання якісних зварних з'єднань. Так, зменшена гравітація сприяє виникненню підвищеної пористості, яка пов'язана з тим, що у слабких гравітаційних полях не відбувається природного спливання пухирців пари чи газу зі зварної ванни у зв'язку з відсутністю сили Архімеда [6]. Це особливо проявляється при зварюванні алюмінієвих, титанових та інших матеріалів з підвищеним вмістом розчинених газів (в основному водню) або елементів з високою пружністю пари (рис. 1) [3, 5, 7, 8].

Водночас алюмінієві сплави мають низку характерних особливостей, що зумовлюють складність процесу їхнього зварювання, серед яких високий рівень спорідненості до кисню і наявність на поверхні окисної плівки Al_2O_3 . Можна вважати, що в умовах зниженої гравітації ці особливості ще більше ускладнюють процес зварювання. Це пояснюється такими факторами. Окисна плівка Al_2O_3 має високу температуру плавлення (2050 °C), не розплавляється у про-

цесі зварювання та покриває рідкий метал, перешкоджаючи утворенню зварної ванни при розплавленні крайків металу, що зварюються. Внаслідок високої адсорбційної здатності до газів і парів води, окисна плівка є джерелом газів і вологи, що розчиняються у металі, тобто є непрямою причиною виникнення несущільностей у металі шва [1]. Для отримання бездефектних з'єднань мають бути вжиті заходи щодо руйнування та видалення окисної плівки [2].

При електронно-променевому зварюванні механізм руйнування та видалення плівки зазвичай є таким. Електрони, що емітують з високою швидкістю, гальмуються у поверхневому шарі зварюваного металу. Таким чином, перетворення кінетичної енергії на теплову відбувається на певній глибині під окисним шаром. Плавлення та миттєве випаровування металу на цій глибині викликають значне збільшення тиску, що сприяє механічному руйнуванню окисної плівки. Крім того, за наявності вакууму порядку 10^{-2} Па та температурі 1450 °C тверда окисна плівка Al_2O_3 в контакт з рідким алюмінієм розкладається за реакцією $(Al_2O_3)_{ТВ} + (4Al)_{РД} \leftrightarrow 3Al_2O$, а пружність парів для субокислу Al_2O при високих температурах у багато разів вища за таку для алюмінію [4]. У результаті постійного підтримування вакууму у процесі зварювання та безперервного



Рис. 1. Рентгенограма стикового з'єднання сплаву АМг6, отриманого електронно-променевим зварюванням на літаючій лабораторії в режимі зниженої гравітації (1/6)g (поверхня Місяця)

видалення субокису Al_2O реакція буде односторонньою: $(Al_2O_3)_{ТВ} + (4Al)_{рл} \rightarrow 3Al_2O$.

Надійне видалення окисної плівки, скоріш за все, зумовлене обома вказаними процесами, характер яких може суттєво змінюватися при низькій гравітації.

Аналогічні побоювання виникають і щодо видалення газоподібних або пароподібних включень із зварної ванни. Якщо в умовах земної гравітації розчинені в рідкому металі гази (головним чином водень) встигають або вийти зі зварної ванни, або зв'язуватися у вигляді твердих розчинів, то при низькій гравітації поділ цих фаз ускладнений. У зв'язку з цим очікується підвищена пористість зварних з'єднань, яка, в кінцевому підсумку, призводить до втрати їхньої герметичності та міцності (рис. 1).

Важливе значення для забезпечення необхідної якості зварних з'єднань має також товщина зварюваних матеріалів [11]. Як було сказано вище, основними матеріалами конструкцій космічного призначення є алюмінієві сплави. Для забезпечення необхідних вимог до зварних з'єднань, зокрема для виключення внутрішніх дефектів у зварних з'єднаннях цих матеріалів заданої товщини, потужність комплексу електронно-променевого обладнання має бути достатньою для зварювання заданих товщин і мати можливість налаштування гострого фокусування електронного пучка для отримання його максимальної щільності [22].

Враховуючи вплив факторів, які сприяють підвищеному утворенню пор у зварних з'єднаннях алюмінієвих сплавів, отриманих ЕПЗ в космічних умовах, і для якісної оцінки фізичної суті утворення пор, було створено спрощену математичну модель процесу з метою запобігання надлишкової пористості у зварних з'єднаннях.

Ця проблема певною мірою посилюється при реалізації режиму зварювання, який супроводжується формуванням парогазового каналу (ПГК). При цьому прийнято виділяти два основні механізми формування пористості металу шва, а саме [16]:

- пухирці домішкових газів (насамперед водню), які сформувалися у розплаві, але не встигли вийти на поверхню зварної ванни і кристалізувалися в ній у вигляді пор. У цьому випадку основною газовою фазою у порах буде газоподібна домішка (атомарний водень);

- нерівномірне по висоті схлопування ПГК, яке призводить до захоплення навколишньої атмосфери та формування несущільностей металу шва, основою газової фази у порах в даному випадку є захисний або робочий газ, а також пари легуючих елементів в основному зварюваному металі, і які швидко випаровуються.

Фізичні процеси, що визначають схильність металу зварного з'єднання до появи такого роду дефектності, є взаємозалежними і суттєво нелінійними. Для їхнього аналізу прийнято використовувати методи математичного моделювання та багатовимірної комп'ютерної імітації [12, 18, 21]. Це дозволяє виділити конкретне фізичне явище та оцінити ступінь його впливу на пороутворення у металі шва.

Зокрема, для зварювання в умовах низької гравітації (аж до невагомості) зміна сили тяжіння впливає як на динаміку спливання пухирців, що утворилися в результаті дифузії домішок впровадження, так і на стійкість ПГК. У цій роботі для отримання якісної картини впливу сили гравітації на схильність зварних з'єднань до утворення дефектів у вигляді пор у металі зварного шва запропоновано комплекс спрощених математичних моделей.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ БАЛАНСУ СИЛ У ПАРОГАЗОВОМУ КАНАЛІ

Оскільки метою даної роботи є якісна оцінка впливу сили гравітації на схильність металу зварного шва до зародження дефектів типу газових пор, які характерні при зварюванні висококонцентрованими джерелами нагрівання, тому для побудови математичних моделей було прийнято низку припущень, а саме:

– висока концентрація джерела зварювального нагрівання, що є необхідною умовою формування ПГК, яка при цьому забезпечує відносно невелику ванну рідкого металу;

– режим стаціонарного ПГК (який характеризується невеликими значеннями числа Пекле), коли форму каналу можна прийняти циліндричною або конічною (див. рис. 2);

– гідродинаміка зварної ванни характеризується невеликими числами Рейнольдса.

Виходячи з викладених припущень, умову рівноваги ПГК можна описати на основі спів-

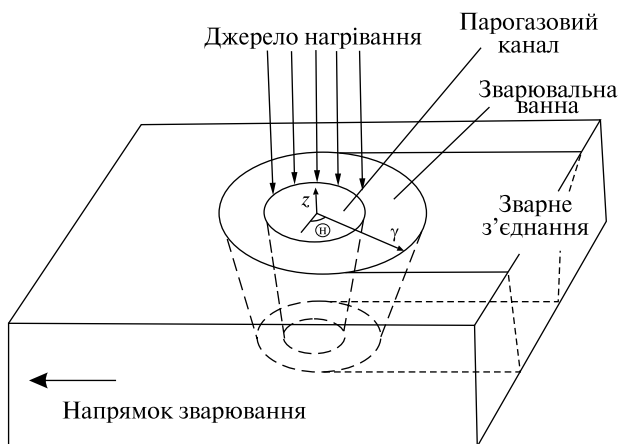


Рис. 2. Умовна схема зварювання зі стаціонарним парогазовим каналом [13]

Таблиця 1. Значення констант A , B , C рівнянь (4) співвідношення між тиском пари та температурою [17]

Елемент	A	B	C	T_M , К
Al	16380	1.0	12.32	2730
Mg	7550	1.41	12.79	1363
Fe	19710	1.27	13.27	3300
Cu	17520	1.21	13.21	2850

відношення гідростатичного балансу [13]:

$$p_a + p_g = p_d + p_h + p_\gamma \quad (1)$$

де p_a — абляційний тиск, викликаний речовиною у процесі її випаровування з поверхні поділу фаз, p_g — тиск пари у ПГК, p_d — гідростатичний тиск, p_h — гідродинамічний тиск, p_γ — поверхневий натяг.

Таким чином, умова (1) встановлює рівновагу між сумарною дією абляційного тиску та тиску пари, які розширюють ПГК, та гідростатичного, гідродинамічного тиску, а також поверхневого натягу, спрямованих на схлопування ПГК.

Абляційний тиск можна кількісно оцінити, виходячи із співвідношення [20]

$$p_a = m_g n_g u_g^2, \quad (2)$$

де m_g , n_g , u_g — маса, питома кількість і швидкість частинок кнудсенівського шару відповідно.

Тиск газу у ПГК розраховується так [15]:

$$p_g = \frac{1}{3} m_g n_g u_g^2 \left(\frac{t}{R_c} \right)^2, \quad (3)$$

де t — товщина зварного виробу, R_c — радіус ПГК.

Для консервативної оцінки абляційного тиску газу в залежності від температури газової фази можна використати наближену формулу [17]:

$$\lg p_a = -\frac{A}{T_M} - B \lg T_M + C, \quad (4)$$

де T_M — температура кипіння компонентів металу, що зварюється, для деяких елементів значення констант наведено в табл. 1.

Гідродинамічний тиск розплаву дорівнює [15]:

$$p_h = p_b - \frac{\rho_m V^2}{2} \frac{8}{Re} R_{km} \cos \Theta, \quad (5)$$

де p_b — константа, яка залежить від граничної умови між ванною розплаву і твердою частиною основного металу, що зварюється, ρ_m — щільність розплавленого металу, R_{km} — безрозмірна функція радіуса ПГК та радіуса навколишньої ванни розплаву, V — швидкість зварювання, Θ — кут у полярній системі координат по відношенню до напрямку зварювання.

Гідростатичний тиск визначається висотою розплаву z :

$$p_\alpha = \rho_m g z, \quad (6)$$

де g — прискорення вільного падіння.

Питоме зусилля від сили поверхневого натягу залежить від радіусів R_1 , R_2 кривизни поверхні розплаву у взаємно перпендикулярних напрямках та коефіцієнта поверхневого натягу γ [19]:

$$p_\gamma = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (7)$$

Розрахунок зусиль на одиницю площі поверхні рідкої ванни у ПГК дозволяє оцінити відхилення від рівноважного стану та визначити вплив конкретного фізичного параметра (в даному випадку сили гравітації, тобто прискорення вільного падіння) на виконання умови схлопування каналу та підвищення схильності до появи пористості металу шва.

Як зазначалося вище, іншим механізмом пороутворення у метали зварного з'єднання є кристалізація металу разом із пухирцями домішкових газів, які не досягли поверхні розплаву за час існування рідкої зварної ванни. Таким чином, характеристикою схильності до появи несучільностей в залежності від сили гравітації може служити швидкість спливання пухирців певного радіуса, яка описується рівнянням Гадамарда — Рибчинського, що є частинним розв'язком рівняння Нав'є — Стокса за умови невеликих значень числа Рейнольдса розплаву [14]:

$$V_b = \frac{2}{9} \cdot \frac{gr^2(\rho_f - \rho_g)}{\mu_f} \cdot \frac{\mu_f + \mu_g}{2\mu_f + 3\mu_g}, \quad (8)$$

де r — радіус пухирця газу, ρ_f , ρ_g — щільність рідини та газу відповідно, μ_f , μ_g — динамічна в'язкість рідини та газу відповідно.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Для якісної оцінки впливу зниженої гравітації на розплавлену ванну у процесі зварювання з кинджальним проплавленням з точки зору схильності до утворення пористості різного типу було розглянуто конкретний приклад з характерними параметрами стану металу. Об'єктом дослідження було обрано технологічний процес стикового електронно-променевого зварювання пластин з алюмінієвого сплаву АМг6 завтовшки $t = 5$ мм, приймалася можливість зміни прискорення вільного падіння від 0 до 9.81 м/с². Параметри наведеної моделі: $\gamma = 0.52$ Н/м, $p_b = 98$ Па, $\rho_f = \rho_m = 2457$ кг/м³, $V =$

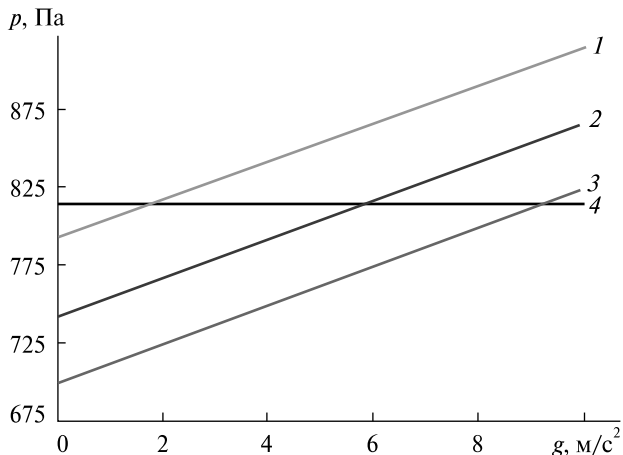


Рис. 3. Залежність зусиль, що розширюють та звужують ПГК, від величини прискорення вільного падіння g : прямі 1, 2, 3 — значення тиску $p_d + p_h + p_g$ при значеннях радіуса ПГК 0.7, 0.75 та 0.8 відповідно; пряма 4 — значення $p_a + p_g$

$= 1 \dots 10$ мм/с, $\Theta = 0$, $R_c = R_1 = 0.75$ мм, $1/R_2 = 0$, $\mu_f = 1.3$ мПа·с, $r = 0.1$ мм. Як показав розрахунок тиску, параметри, які визначають баланс ПГК, мають такі значення: $p_a = 765$ Па, $p_g = 50$ Па, $p_g = 0 \dots 123$ Па, $p_g = 693$ Па, $p_h = 49$ Па.

Таким чином, з точки зору гідростатичного балансу (1) вплив гравітації на стабільність ПГК проявляється у досить вузькому діапазоні технологічних параметрів, що зумовлено невеликим вкладом гідростатичного тиску в сумарний баланс тисків: найбільший вплив на даний процес має співвідношення абляційного тиску та сили поверхневого натягу. Це означає, що отримані в умовах земної гравітації ($g = 9.81$ м/с²) оптимальні режими зварювання можна використовувати і при зменшеній гравітації. До того ж зменшення сили гравітації та відповідне зменшення гідростатичного тиску справляє невеликий позитивний ефект на стабільність ПГК і знижує схильність до появи пор, викликаних локальним схлопуванням каналу у процесі зварювання. Навпаки, збільшення прискорення вільного падіння може призвести до погіршення стабільності ПГК та появи пор в області кореня зварного шва.

На рис. 3 показано вплив величини прискорення вільного падіння на величину сумарного тиску $p_a + p_v$ (зусилля на розширення каналу) та $p_h + p_g + p_\gamma$ (зусилля на стиснення каналу) при

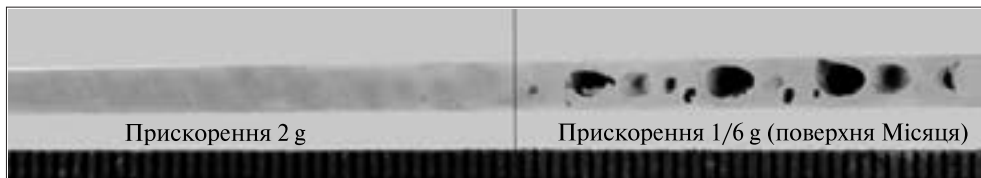


Рис. 4. Макрошліф поверхневого зрізу зразка стикового з'єднання зі сплаву АМг6, отриманого за один прохід електронно-променевим зварюванням на літаючій лабораторії в режимі перевантаження з прискоренням 2g і в режимі зниженого прискорення (1/6)g (поверхня Місяця) [10]

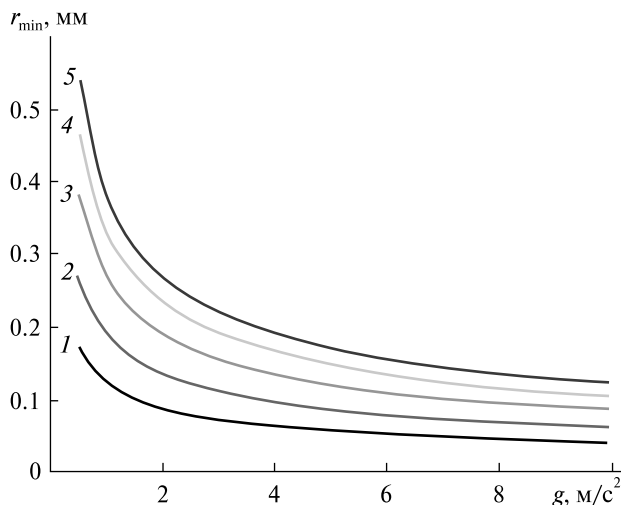


Рис. 5. Залежність значення мінімального радіуса пухирця r_{\min} , який встигне спливати за час життя зварної ванни від прискорення вільного падіння g при різних швидкостях зварювання: 1 — 1.0 мм/с, 2 — 2.5 мм/с, 3 — 5.0 мм/с, 4 — 7.5 мм/с, 5 — 10.0 мм/с

різних значеннях радіуса ПГК. Точки перетину наведених залежностей відповідають рівноважному стану ПГК, який зміщується в область меншої гравітації при зменшенні радіуса каналу (збільшенні сили поверхневого натягу).

У випадку альтернативного механізму зародження несущільностей, а саме кристалізації пухирців домішкових газів, слід очікувати протилежного впливу сили гравітації на схильність металу шва до пороутворення. Як видно з формули (8), швидкість спливання пропорційна прискоренню вільного падіння, тому зниження гравітації буде призводити до зменшення швидкості спливання пухирців газу і підвищення схильності пороутворення у металі зварного з'єднання. Також суттєвим показником є радіус

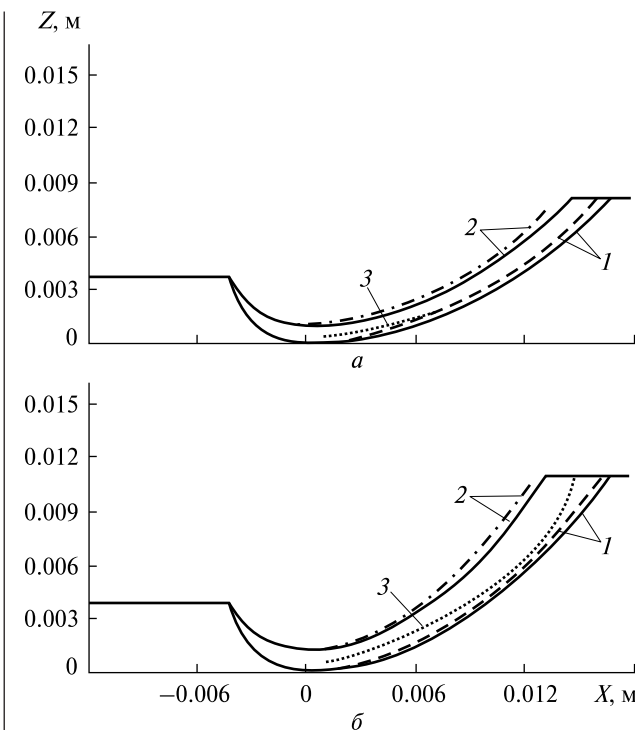


Рис. 6. Розраховані траєкторії газового пухирця ($r_0 = 0.3$ мм): 1 — фронт кристалізації у вихідному положенні (суцільна крива) та після переміщення за час t (штрихова); 2 — границя ванни (суцільна і штрихова ті самі, що й в кривій 1); 3 — траєкторія пухирця [21] (випадок a — пухирець не спливає, утворюється пора, випадок b — пухирець спливає)

пухирця газу, що зародився, квадрат значення якого входить у формулу (8). Це означає, що при зменшенні гравітації, з одного боку, збільшуватиметься концентрація пор у металі шва, з іншого — зростатимуть розміри окремих пор, і навпаки, при збільшенні прискорення вільного падіння пори будуть відсутні (рис. 4). Слід зазначити, що використане наближення не враховує про-

цесів гідродинаміки зварної ванни, які за певних обставин, зокрема при великих значеннях числа Рейнольдса, можуть мати суттєвий вплив на стабільність ПГК в умовах зниженої гравітації.

Якщо припустити, що оптимальний режим зварювання відповідає часу стаціонарного спливання газового пухирця, який є меншим, ніж час існування зварної ванни, можна якісно оцінити вплив умов гравітації на схильність до появи таких дефектів. На рис. 5 наведено залежності мінімального радіуса пухирця r_{\min} , який встигне спливати за час існування зварної ванни, наведеної джерелом нагрівання при різній швидкості зварювання від прискорення вільного падіння g . З наведених даних видно, що при зменшенні прискорення вільного падіння нижче 3 м/с^2 різко збільшується розмір пухирців газу, які не встигнуть спливати до повної кристалізації розплаву ванни і сформуєть сферичну несучільність металу шва, що якісно підтверджується результатами натурних експериментів.

Крім того, моделювання руху газових пухирців у зварній ванні показує (рис. 6, а), що при певних параметрах зварювання вони не встигають спливати, і можуть захоплюватися зубчастим фронтом кристалізації, викликаючи утворення пор у зварних швах [6].

Проте параметрами процесу зварювання можна створювати такі умови, при яких газовий пухирець виходить на вільну поверхню рідкої ванни і залишає її. Пори при цьому у металі шва не утворюються (рис. 6, б).

Таким чином, розрахунки у рамках запропонованої математичної моделі показали, що траєкторія газового пухирця може перетинатися з рухомим зубчастим фронтом кристалізації ванни або виходити на вільну поверхню. У першому випадку пори виникають у середній частині шва, а у другому — пори не утворюються. Врахування цих факторів при виборі технологічних параметрів процесу зварювання (зокрема швидкості, потужності джерела нагрівання та програмоване керування інтенсивністю нагрівання сканувальним електронним пучком) дозволяє отримувати бездефектні зварні з'єднання.

Така модель дозволяє оцінити вплив різних параметрів процесу електронно-променевого

зварювання на ймовірність утворення пор і намітити заходи боротьби з ними.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз факторів, які сприяють підвищеному утворенню пор у зварних швах при електронно-променевому зварюванні алюмінієвих сплавів в умовах зниженої гравітації на основі припущень умов гідростатичного балансу ПГК. Для цього запропоновано якісну математичну модель для оцінки схильності металу зварного з'єднання, отриманого кинджальним проплавленням за допомогою висококонцентрованого джерела зварювального нагрівання, до зародження пор у металі зварного шва. Розглянуто два основних механізми зародження дефектності, а саме локальне схлопування ПГК і кристалізація пухирців домішкових газів, які не встигають спливати на поверхню розплаву за час існування зварної ванни.

2. Показано, що найбільший вплив на стійкість ПГК надає співвідношення абляційного тиску та сили поверхневого натягу, які несуттєво залежать від сили гравітації. У свою чергу, гідростатичний тиск зменшується при зменшенні сили гравітації, що має невеликий позитивний ефект на стабільність ПГК і знижує схильність до появи пор, зумовлених локальним схлопуванням каналу у процесі зварювання.

3. Показано суттєвий вплив сили гравітації та розмірів пухирців газу на швидкість їхнього спливання з розплаву. При цьому при зменшенні прискорення вільного падіння нижче 3 м/с^2 різко збільшується розмір пухирців газу, які не встигають спливати до повної кристалізації ванни розплаву, і формують сферичну несучільність металу шва. Це підтверджується наявними експериментальними даними про підвищення схильності зварних швів до появи пористості за низької гравітації. Але врахування цього фактора при виборі технологічних параметрів процесу зварювання (зокрема швидкості та потужності джерела нагрівання) дозволяє отримувати бездефектні зварні з'єднання.

Результати досліджень, використані у статті, були отримані при виконанні робіт, що проводилися в рамках Цільової програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2018—2022 рр.

ЛІТЕРАТУРА

1. Антонова М. М. *Свойства гидридов металлов*. Справочник. Киев, 1975. 128 с.
2. Бондарев А. А. Влияние технологических факторов на свойства и плотность сварных швов алюминиевых сплавов, выполненных электронно-лучевой сваркой. *Автомат. сварка*. 1972. № 5. С. 24—26.
3. Бондарев А. А., Лапчинский В. Ф., Лозовская А. В., Терновой Е. Г. Исследование структуры и распределения элементов в сварных соединениях, выполненных электронным лучом на сплавах 1201 и АМг6 в условиях невесомости. *Космос: Технологии, Материаловедение, Конструкции*. Сб. науч. тр. под. ред. акад. Б. Е. Патона. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2000. С. 247—252.
4. Бондарев А. А., Рабкин Д. М. Испарение легколетучих элементов при электроннолучевой сварке алюминиевых сплавов. *Автомат. сварка*. 1974. № 3. С. 13—16.
5. Патон Б. Е., Кубасов В. Н. Эксперимент по сварке металлов в космосе. *Автомат. сварка*. 1970. № 5. С. 7—12.
6. Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф. *Сварка и родственные технологии в космосе. Особенности и перспективы*. Киев: Наук. думка, 1998. 182 с.
7. Рабкин Д. М., Лапчинский В. Ф., Терновой Е. Г., Лозовская А. В., Мнищенко С. В., Бондарев А. А., Дзыкович И. Я. Исследование свойств и структуры сварных соединений из сплава 1201, выполненных электронным лучом при различных уровнях гравитации и низких температурах. *Космос: Технологии, Материаловедение, Конструкции*. Сб. науч. тр. под. ред. акад. Б. Е. Патона. Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 2000. С. 236—243.
8. Терновий Є. Г., Патон Б. Є., Лобанов Л. М., Асніс Є. А., Зубченко Ю. В., Статкевич І. І. Комплекс аппаратури для електронно-променевого зварювання в умовах паверхні Місяця. 7-ма Міжнар. конф. «Космічні технології: сучасне і майбутнє». Тези доп. Дніпро, 2019. С. 113.
9. Терновой Е. Г., Бондарев А. А., Лапчинский В. Ф., Гавриш С. С., Афанасьев И. В., Филимонов В. И. Исследование некоторых вопросов свариваемости алюминиевых сплавов в невесомости. *Космич. исслед. на Украине*. 1976. Вып. 9. С. 5—11.
10. Терновой Е. Г., Бондарев А. А., Лапчинский В. Ф., Лозовская А. В. Влияние гравитационных сил, растворенного водорода и исходной температуры на свойства и плотность сварных соединений при электронно-лучевой сварке легких конструкционных сплавов. *Космос: Технологии, Материаловедение, Конструкции*. Сб. науч. тр. под. ред. акад. Б. Е. Патона. Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2000. С. 243—246.
11. Терновой Е. Г., Лобанов Л. М. Особенности электронно-лучевой сварки толстостенных оболочек из алюминиевых сплавов. 7-ма Міжнар. конф. «Космічні технології: сучасне і майбутнє». Тези доп. Дніпро, 2019. С. 93.
12. Alexoroulou V. E., Papazoglou E. L., Karmiris-Obratański P., Markopoulos A. P. 3D finite element modeling of selective laser melting for conduction, transition and keyhole modes. *J. Manufacturing Processes*. 2022. 75. P. 877—894.
13. Blackburn J. E. Understanding porosity formation and prevention when welding titanium alloys with 1 μm wavelength laser beams. A thesis for the degree of Doctor of Engineering. Faculty of Engineering and Physical Sciences. School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering. The University of Manchester. 2011.
14. Clift R., Grace J. R., Weber M. E. *Bubbles, drops and particles*. New York: Dover Publication Inc, 2013. 400 p.
15. Duley W. W. *Heat transfer and modelling in laser welding. Laser Welding*. New York: Wiley & Sons, 1999. 264 p.
16. Forsman T. *Laser Welding of Aluminium Alloys*. Doctoral Thesis. Department of Materials and Manufacturing Engineering Division of Manufacturing Systems Engineering. Lulea University of Technology. 2000.
17. Iida T., Guthrie R. I. L. *The Physical Properties of Liquid Metals*. Oxford: Clarendon Press, 1993. 288 p.
18. Jingsheng W., Renzhi H., Xin C., Shengyong P. Modeling fluid dynamics of vapor plume in transient keyhole during vacuum electron beam welding. *Vacuum*. 2018. 15. 157. P. 277—290.
19. Klein T., Vicanek M., Kroos J., Decker I., Simon G. Oscillations of the keyhole in penetration laser beam welding. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1994. 27. P. 2023—2030.
20. Kroos J., Gratzke U., Simon G. Towards a self-consistent model of the keyhole in penetration laser beam welding. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1993. 26. P. 474—480.
21. Milenin E., Velikoivanenko G., Rozynka G., Pivtorak N. Residual strength and reliability of corroded pipelines — Monte-Carlo approach for consideration of spatially nonuniform material properties. *Structural Integrity*. 2019. 8. P. 321—326.
22. Paton B. E., Lobanov L. M., Asnis Yu. A., Ternovoj E. G., Zubchenko Yu. V. Equipment and technology for electron-beam welding in space. *Space Materials and Technologies*. 2017. 23(4). P. 27—32.

REFERENCES

1. Antonova M. M. (1975). *Properties of metal hydrides. Directory*. Kyiv, 128 p. [in Russian].
2. Bondarev A. A. (1972). The influence of technological factors on the properties and density of welds of aluminum alloys made by electron beam welding. *Automatic welding*, № 5, 24–26 [in Ukrainian].
3. Bondarev A. A., Lapchynskiy V. F., Lozovskaia A. V., Ternovoj E. H. (2000). Investigation of the structure and distribution of elements in welded joints made by an electron beam on 1201 and AMg6 alloys under weightless conditions. *Space: Technology, Materials Science, Constructions. Collection of scientific papers under. edited by Academician B. E. Paton*. Kyiv: PWI them. E. O. Paton NAS of Ukraine, 247–252 [in Russian].
4. Bondarev A. A., Rabkin D. M. (1974). Evaporation of volatile elements during electron beam welding of aluminum alloys. *Automatic welding*, № 3, 13–16 [in Russian].
5. Paton B. E., Kubasov V. N. (1970). Experiment on welding metals in space. *Automatic welding*, № 5, 7–12 [in Russian].
6. Paton B. E., Lapchinsky V. F. (1998). *Welding and related technologies in space. Peculiarities and Prospects*. Kyiv: Naukova dumka, 182 p. [in Russian].
7. Rabkyn D. M., Lapchynskiy V. F., Ternovoj E. H., Lozovskaia A.V., Mnyshenko S.V., Bondarev A.A., Dzykovych Y. Ya. (2000). Investigation of the properties and structure of welded joints from alloy 1201, made by an electron beam at various levels of gravity and low temperatures. *Space: Technology, Materials Science, Constructions. Collection of scientific papers under. edited by Academician B. E. Paton*. Kyiv: PWI them. E.O. Paton National Academy of Sciences of Ukraine, 236–243 [in Russian].
8. Ternovyi Y. G., Paton B. E., Lobanov L. M., Asnis Y. A., Zubchenko Yu. V., Statkevych I. I. (2019). Complex of equipment for electron-beam welding in Moon surface conditions. *7th Int. conf. "Space technologies: present and future"*: Abstracts reports. Dnipro, 113 [in Ukrainian].
9. Ternovoj E. H., Bondarev A. A., Lapchynskiy V. F., Havrysh S. S., Afanas'ev Y. V., Fylymonov V.Y. (1976). Investigation of some issues of weldability of aluminum alloys in weightlessness. *Space res. in Ukraine*, № 9, 5–11 [in Russian].
10. Ternovoj E. H., Bondarev A. A., Lapchynskiy V. F., Lozovskaia A. V. (2000). Influence of gravitational forces, dissolved hydrogen and initial temperature on the properties and density of welded joints in electron-beam welding of light structural alloys. *Space: Technology, Materials Science, Constructions. Collection of scientific papers under. edited by Academician B. E. Paton*. Kyiv: PWI them. E. O. Paton NAS of Ukraine, 243–246 [in Russian].
11. Ternovyi Y. G., Lobanov L. M. (2019). Features of electron-beam welding of thick-walled shells made of aluminium alloys. *7th Int. conf. "Space technologies: present and future"*. Abstracts reports. 93 [in Russian].
12. Alexopoulou V. E., Papazoglou E. L., Karmiris-Obratański P., Markopoulos A. P. (2022). 3D finite element modeling of selective laser melting for conduction, transition and keyhole modes. *J. Manufacturing Processes*, **75**, 877–894.
13. Blackburn J. E. (2011). Understanding porosity formation and prevention when welding titanium alloys with 1 μm wavelength laser beams. A thesis for the degree of Doctor of engineering. Faculty of Engineering and Physical Sciences. School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering. The University of Manchester.
14. Clift R., Grace J. R., Weber M. E. (2013). *Bubbles, drops and particles*. New York. Dover Publication Inc., 400 p.
15. Duley W. W. (1999). *Heat transfer and modelling in laser welding. Laser Welding*. New York: Wiley & Sons, 264 p.
16. Forsman T. (2000). Laser welding of aluminium alloys. Doctoral Thesis. Department of Materials and Manufacturing Engineering Division of Manufacturing Systems Engineering. Lulea University of Technology.
17. Iida T., Guthrie R. I. L. (1993). *The Physical Properties of Liquid Metals*. Oxford: Clarendon Press, 288 p.
18. Jingsheng W., Renzhi H., Xin C., Shengyong P. (2018). Modeling fluid dynamics of vapor plume in transient keyhole during vacuum electron beam welding. *Vacuum*, **15**, 277–290.
19. Klein T., Vicanek M., Kroos J., Decker I., Simon G. (1994). Oscillations of the keyhole in penetration laser beam welding. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **27**, 2023–2030.
20. Kroos J., Gratzke U., Simon G. (1993). Towards a self-consistent model of the keyhole in penetration laser beam welding. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **26**, 474–480.
21. Milenin A., Velikoivanenko E., Rozyinka G., Pivtorak N. (2019). Residual strength and reliability of corroded pipelines — Monte-Carlo approach for consideration of spatially nonuniform material properties. *Structural Integrity*, **8**, 321–326.
22. Paton B. E., Lobanov L. M., Asnis Yu. A., Ternovoj E. G., Zubchenko Yu. V. (2017). Equipment and technology for electron-beam welding in space. *Space Materials and Technologies*, **23**(4). 27–32.

Стаття надійшла до редакції 14.11.2022

Після доопрацювання 20.12.2022

Прийнято до друку 20.12.2022

Received 14.11.2022

Revised 20.12.2022

Accepted 0.12.2022

L. M. Lobanov, Deputy Director, Dr. Sci. in Tech., Prof., Acad. NAS of Ukraine. Honored Worker of Science and Technology of Ukraine (2004), Gold Medal. B. Paton “For outstanding achievements in the creation of innovative scientific and technical developments that have found wide practical use” (2022)

ORCID: 0000-0001-9296-2335

E-mail: office@paton.kiev.ua

O. S. Milenin, Senior Researcher, Dr. Sci. in Tech., Leading Researcher, Member of the American Society of Mechanical Engineers

ORCID: 0000-0002-9465-7710

E-mail: asmilenin@ukr.net

Y. H. Ternovyi, Deputy Head of the Department of Space Technologies

ORCID: 0000-0002-4323-0944

E-mail: ev-geo@ukr.net

N. V. Piskun, Head of the Department of Space Technologies, Dr. Sci. in Tech.

ORCID: 0000-0003-1459-2310

E-mail: nadamova54@gmail.com

S. O. Hlushak, Researcher

ORCID: 0000-0003-4518-7262

E-mail: electriber@ukr.net

I. I. Statkevich, Researcher

ORCID: 0000-0001-9403-2123

E-mail: statkevich_igor@ukr.net

L. M. Radchenko, Leading Engineer

ORCID: 0000-0002-4235-2413

E-mail: rleonid190@gmail.com

E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine
11, Kazimir Malevich Str, Kyiv, 03150 Ukraine

REGULARITIES OF POROSITY FORMATION IN ELECTRON BEAM WELDING OF ALUMINUM ALLOYS UNDER LOW GRAVITY

The use of welding processes in open space is necessary for the manufacture, assembly, and repair of large-sized structures of space stations both in the near-Earth orbit and during the exploration of the Moon, where it is planned the creation of long-term lunar bases, as well as other objects that ensure the activities and work of expeditions. These can be subassembly operations in creating pressure-tight buildings for residential and industrial use, as well as for storing energy resources, pipelines of space complexes, or repair for ensuring the long-term operation of existing systems.

Electron beam welding (EBW) is an optimal and more technological process for these works in comparison with other welding methods. Deep vacuum and low temperatures, which are the natural environment under space conditions, encourage the use of electron beam technologies, including welding. The efficiency of this process is 85–90 %, which is the maximum one in comparison with other welding methods. EBW under Earth gravity allows gaining the mechanical and chemical properties, as well as vacuum tightness of welded joints at the level of the parent metal.

Performing EBW in conditions of ultrahigh vacuum, low gravity, and low temperatures is complicated, therefore, the quality of welded joints may decrease. The obtained results of the experiments conducted under conditions of low gravity and low temperatures in space, as well as in the flying laboratory, showed an increased number of pores in the welds. First of all, this phenomenon was detected in the welding of samples made of aluminum alloys. They are widely used in creating space structures, which does not exclude the possibility of their application in the manufacture of welded structures on the Moon's surface.

The aim of this work is the studying the regularities of porosity formation in the metal of the welded joints made of aluminum alloys in EBW under low gravity by qualitative analysis of the main factors that determine the increased susceptibility to the formation of discontinuities of this type.

Keywords: electron beam welding, aluminum alloy, welded joint, ultra-high vacuum, reduced gravity, porosity formation, key-hole, gas bubbles, discontinuity, collapse, balance of forces, hydrodynamics, ablation pressure, Reynolds numbers, hydrostatic balance, gas bubble trajectory.