
Раздел I

ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА РАСПЛАВОВ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ, СМАЧИВАНИЕ, АДГЕЗИЯ

УДК 546.811:549.5:541.1

Т. В. Сидоренко, В. В. Полуянська, Ю. В. Найдіч*

ВПЛИВ ПАРЦІАЛЬНОГО ТИСКУ КИСНЮ НА ПРОЦЕСИ ЗМОЧУВАННЯ ТА КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ В СИСТЕМАХ, ЩО МІСТЯТЬ МЕТАЛІЧНІ РОЗПЛАВИ ТА КЕРАМІКУ НА ОСНОВІ ДІОКСИДУ ОЛОВА

Вивчено процеси змочування та контактної взаємодії металічних розплавів та керамічних матеріалів на основі діоксиду олова (SnO_2 , SnO_2 —1% (мас.) Fe_2O_3 , SnO_2 —0,5% (мас.) CuO) в газових середовищах з різним парціальним тиском кисню в системі (повітря, чистий проточний кисень). Отримано концентраційні залежності крайових кутів змочування поверхні керамічних матеріалів для низки металевих розплавів (Ag—Cu , Ag—Ge , Ag—Pb) з розчиненням в них до рівноважного стану киснем. Досліджено мікроструктуру зони контакту кераміка—метал.

Ключові слова: діоксид олова, змочування, контактна взаємодія, кисневмісне газове середовище.

Вступ

Керамічні матеріали давно знайшли своє застосування в різних галузях сучасної техніки. Для їх міцного з'єднання між собою або приєднання до них інших компонентів (металевих електродів, деталей тощо) часто використовують паяння. Вибір складу припою та створення оптимального технологічного режиму є важливим напрямком досліджень для сучасного матеріалознавства. Високий ступінь змочування є одним з головних факторів, що забезпечують надійне з'єднання матеріалів, а також високу адгезійну міцність отриманих паяних швів [1].

Як свідчить практика, кераміка не змочується стандартними припойними сплавами [2—5]. Для збільшення змочувальної активності

* Т. В. Сидоренко — кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ; В. В. Полуянська — науковий співробітник цієї ж установи; Ю. В. Найдіч — академік НАН України, доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник цієї ж установи.

припою зазвичай в його основу вводять металеві добавки Ti, Zr, Nb та інші, що мають високу хімічну спорідненість до атомів твердої фази. Але через особливості електрофізичних властивостей певних типів керамічних матеріалів подібний метод не завжди є дієвим. Так, наприклад, стехіометричний сегнетоелектричний титанат барію BaTiO₃ не можна паяти титановмісними припоями у вакуумі за високих температур, оскільки за таких умов він втрачає кисень, перетворюючись на нестехіометричну сполуку з напівпровідниковими властивостями BaTiO_{3-x} [6].

Для кераміки з іонним або іонно-ковалентним типом зв'язку, крім традиційних добавок, які мають високу хімічну спорідненість до атомів твердої фази, можна використовувати й альтернативні активні добавки, що здатні впливати на ступінь змочування. Зокрема, це стосується неметалічних електронегативних елементів VIa—VIIa груп періодичної системи (O, S, Se, F, Cl, Br), які мають високу спорідненість до електрона [7]. Такі добавки, розчинені в металі, здатні зменшити поверхневу та міжфазну енергію на міжфазних границях рідина—газ, рідина—тверде тіло.

Вплив кисню на капілярні та адгезійні властивості кераміко-металічних контактних систем досліджений та обговорений раніше для багатьох оксидних систем (Cu—O—Al₂O₃, Cu—O—Mg, Ni—O—Al₂O₃, Ag—O—Al₂O₃, Ag—Cu—O—Al₂O₃) [2—4]. Однак слід зазначити, що система Ag—Cu—O особливо перспективна, оскільки вона дозволяє проводити експерименти та технологічні процеси в кисневмісному (повітряному, кисневому) середовищі.

Відомо, що додавання третього компонента в розплав суттєво впливає на активність кисню в рідкому металі, що спричиняє підвищення вмісту кисню в розплаві [8, 9]. Саме цей принцип можна використовувати для покращення змочування, наприклад, оксидної, в тому числі перовськітної кераміки. Для того щоб зрозуміти природу та причини такої дії електронегативних елементів, потрібно починати розгляд з найбільш вивчених систем, що містять кисневмісний сплав у контакті з оксидною поверхнею.

Механізм поверхневої та міжфазної активності кисню детально розглянуто в роботах [3, 6]. Суть його полягає у наступному: в рідкому (розплавленому) металі кисень існує у формі, близької до іону O²⁻, і може утворювати метало-кисневий комплекс (Me²⁺—O²⁻). Позитивний металевий іон комплексу адсорбується на негативно зарядженій твердій поверхні іонної підкладки. Локалізація зовнішніх електронів металевого атома на кисні повинна послабити металевий зв'язок металевого іона (Me²⁺) з іншими атомами металу. Таким чином, зв'язок між металевим іоном Me²⁺ метало-кисневого комплексу та іншими металевими атомами повинен бути більш слабким, ніж металевий зв'язок атомів один з одним: енергія зв'язку “комплекс—Me” менша за енергію зв'язку Me—Me. Це є термодинамічною умовою поверхневої активності для комплексу метал—кисень. Частинки рідини (атоми, молекули), що слабо пов'язані з іншими частинками, рухаються з об'єму на поверхню рідини. Адсорбція позитивних металевих іонів на негативно зарядженій поверхні оксиду й спричиняє високу адгезію.

З цих причин кисневмісний сплав добре змочує поверхні твердих оксидів та інших іонних сполук. Роль електронегативних елементів у механізмі поліпшення змочування полягає у втраті валентних електронів металевим атомом і в утворенні металевого іона (Me^+ або Me^{2+}). Роль кисню не є винятковою. Інші неметалічні елементи з високою спорідненістю до електрона, зокрема сірка, селен, галогени, а також складні аніони (SO_4^{2-} , PO_4^{3-} тощо), можуть спричиняти подібний ефект, поліпшуючи змочування. Таке узагальнення було зроблено в роботі [10] й розвинуте в [3].

Отже, в даній роботі досліджено змочування в середовищі кисню з різним парціальним тиском (повітря, чистий кисень) поверхні керамічних матеріалів на основі діоксиду олова металевими розплавами з розчиненим в них рівноважним вмістом кисню.

Експеримент та обговорення його результатів

Для експериментів по змочуванню використано зразки кераміки, що спікалися з порошку SnO_2 з додаванням певної кількості порошоків Fe_2O_3 або CuO для отримання підкладок певної щільності та поруватості: зразки SnO_2 мали поруватість $\sim 40\%$, $SnO_2 + 1\%$ (ат.) Fe_2O_3 — близько 5% , $SnO_2 + 0,5\%$ (ат.) CuO — 12% [11]. Керамічні зразки діаметром 20 мм і товщиною 3 мм заздалегідь відшліфовані та відполіровані (шорсткість поверхні R_a складала 0,08 мкм).

Експерименти по змочуванню кераміки на основі діоксиду олова (SnO_2 , $SnO_2-1Fe_2O_3$, $SnO_2-0,5CuO$) розплавами чистого срібла, а також сплавами $Ag-Cu$, $Ag-Ge$, $Ag-Pb$ з розчиненим в них киснем проводилися у повітряному та кисневому середовищах методом “лежачої краплі”, який був детально описаний в роботах [3, 6, 12, 13].

Результати експериментів по змочуванню у повітряному середовищі керамічних матеріалів на основі діоксиду олова (SnO_2 , $SnO_2-1\%$ (ат.) Fe_2O_3 , $SnO_2-0,5\%$ (ат.) CuO) розплавом $Ag-Cu$ з різним вмістом міді представлені на рис. 1 та 2. Показано, що мідь, додана у розчин срібла, суттєво покращує змочування на усіх типах досліджуваних керамічних підкладок. Найбільш різке зменшення значень крайових кутів змочування спостерігається на ділянці до 3% (ат.) міді в розплаві срібла, після чого процес уповільнюється. Подібна тенденція характерна й для інших досліджених нами для порівняння керамічних сполук (рис. 2).

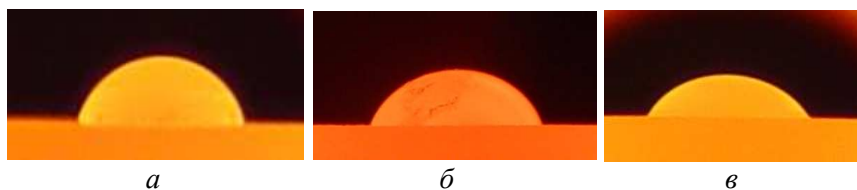


Рис. 1. Фотографії крапель розплаву $Ag-3\%$ (ат.) Cu на поверхні кераміки на основі діоксиду олова: *a* — SnO_2 ; *б* — $SnO_2-1\%$ (ат.) Fe_2O_3 ; *в* — $SnO_2-0,5\%$ (ат.) CuO

Fig. 1. Photos of the drops of the $Ag-3\%$ (at.) Cu melt on the tin dioxide ceramic surface: *a* — SnO_2 ; *б* — $SnO_2-1\%$ (at.) Fe_2O_3 ; *в* — $SnO_2-0,5\%$ (at.) CuO

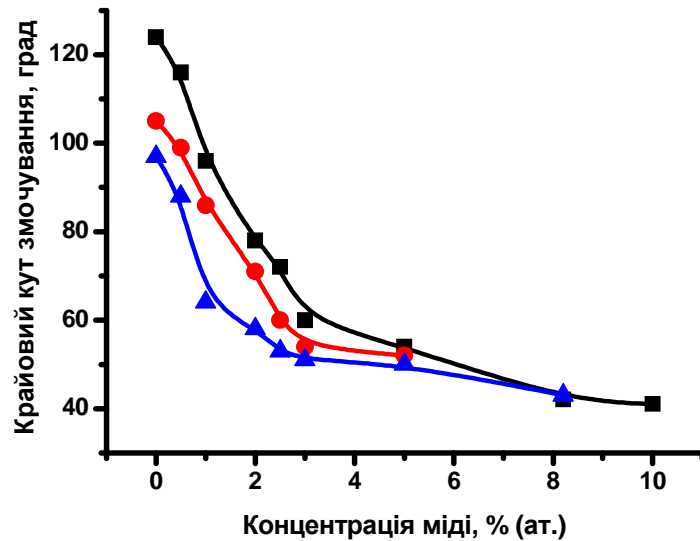


Рис. 2. Залежність крайового кута змочування деяких керамічних сполук від вмісту міді в розплаві срібла (повітря, 1373 К): ■ — SnO₂; ● — Al₂O₃; ▲ — SiO₂

Fig. 2. Dependence of wetting contact angle of some ceramic compounds at copper content in the melt silver (air, 1373 K): ■ — SnO₂; ● — Al₂O₃; ▲ — SiO₂

Результати досліджень показали, що кисень з повітря, розчиняючись в розплаві й окиснюючи мідь, суттєво поліпшує ступінь змочування іонних (іонно-ковалентних) сполук, зокрема діоксиду олова та інших оксидних матеріалів.

Слід зазначити, що введення до складу твердої фази додатково оксидів заліза або міді (1% (ат.) Fe₂O₃, 0,5% (ат.) CuO) також підвищує змочування в системі кераміка на основі діоксиду олова—металевий розплав. Тобто можна припустити, що відбувається додаткове легування SnO₂, за рахунок чого збільшується електронегативність поверхневого шару твердої підкладки.

Після охолодження краплі Ag—3% (ат.) Cu на поверхні SnO₂ навколо краплі візуально спостерігається потемніння кераміки. Це явище, ймовірно, можна пояснити взаємодією, яка відбувається на поверхні кераміка—металевий розплав [14]. Подібне явище спостерігали автори робіт [15] для ZrO₂, [14] — для TiO₂, [6] — для перовськітних матеріалів. Але якщо для діоксидів цирконію та титану потемніння кераміки обумовлене втратою кисню та утворенням нестехіометричної сполуки, то для діоксиду олова потемніння в зоні контакту кераміки з розплавом Ag—Cu відбувається за рахунок утворення чорного шару CuO. Для розробки припойних композицій і режимів паяння подібних матеріалів дуже важливо враховувати цей факт і контролювати вміст міді.

Порівнюючи дані, отримані експериментально в цій роботі, з літературними, слід зазначити, що крайові кути змочування для чистого срібла, наведені в роботі [16], досить близькі ($\theta_{\text{експ}} \text{ SnO}_2 = 122$ град, $\theta_{[16]} \text{ SnO}_2 = 130$ град). Однак в роботі [17] отримано крайові кути

змочування для чистого срібла на кераміці SnO_2 $72,4 \pm 4,3$ град, тобто $\theta < 90$ град. Це дещо несподіваний результат, оскільки срібло не повинне взаємодіяти з діоксидом олова (ΔG_0 реакцій у вказаному інтервалі температур мають позитивне значення). Але автори не змогли пояснити отримані дані.

В наших експериментах за температури плавлення срібла відбувається лише часткове просочення з утворенням тонкого шару на міжфазній границі. Отже, зі змочуванням пористих підкладок SnO_2 для системи реалізуються капілярні явища. У роботі [17] автори також спостерігали просочування срібла крізь підкладку з утворенням досить міцного шару металокераміки ("повне просочування").

На рис. 3 представлено мікроструктуру зони контакту кераміка—розплав Ag —3% (ат.) Cu . На міжфазній границі формується темний перехідний шар товщиною 5—8 мкм, який містить велику кількість міді. Подібне явище спостерігалось й на міжфазній границі інших оксидних матеріалів.

Вивчено змочування кераміки SnO_2 розплавами срібла з додаванням германію та свинцю (Ag — Ge та Ag — Pb). Результати експериментів по змочуванню цих систем у повітрі за температури 1273 К представлені на рис. 4. Як видно, добавка германію сприяє підвищенню ступеню змочування розплавом поверхні кераміки SnO_2 . Це відбувається завдяки тому, що германій добре взаємодіє з киснем повітря.

Порівнюючи дані змочування для різних оксидних систем (рис. 4), можна зазначити, що в цілому спостерігається схожа тенденція: крайові кути змочування знижуються й досягають досить низьких значень із вмістом германію 10% (ат.). Однак, на відміну від "класичного" Al_2O_3 , для оксидів IVа групи періодичної системи (SiO_2 , SnO_2), які досліджувалися в даній роботі, відбувається більш різке покращення змочування, низькі значення крайових кутів досягаються за меншої концентрації германію в сріблі (близько 8% (ат.)) і з подальшим збільшенням його вмісту в розплаві майже не змінюються.

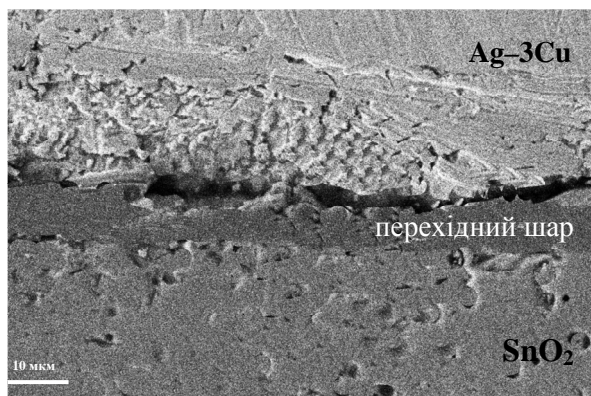


Рис. 3. Мікроструктура контактної зони в системі $(\text{Ag}$ —3% (ат.) Cu)— SnO_2 (шліф отриманий після змочування зразка на повітрі, 1273 К)

Fig. 3. Microstructure of the contact zone in the $(\text{Ag}$ —3% (at.) Cu)— SnO_2 system (grinding was obtained after wetting of the sample in air, 1273 K)

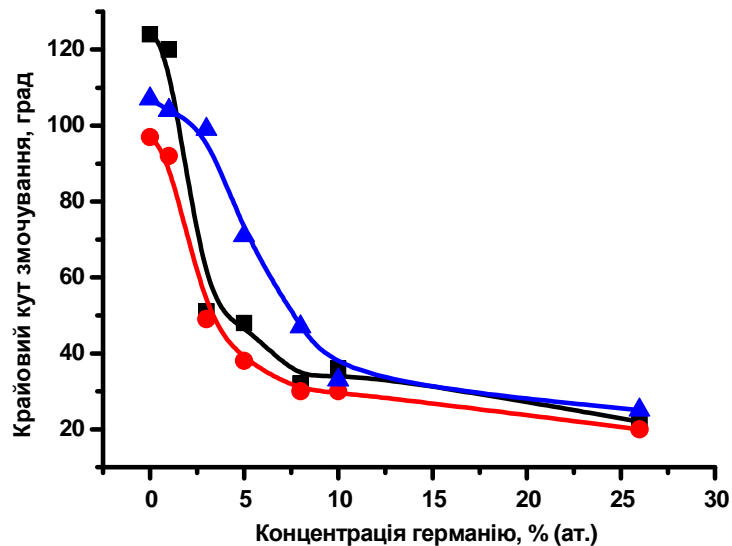


Рис. 4. Залежність крайового кута змочування оксидної кераміки від концентрації германію в розчині (повітря, 1273 К): ■ — SnO₂; ● — SiO₂; ▲ — Al₂O₃

Fig. 4. Dependence of the contact angle of oxide ceramics at the germanium concentration in solution (air, 1273 K): ■ — SnO₂; ● — SiO₂; ▲ — Al₂O₃

Отже, враховуючи отримані у повітряному середовищі дані, можна стверджувати, що добавки міді та германію в розплав срібла є досить ефективними для підвищення ступеня змочування в системах, які містять діоксид олова. Це відбувається за рахунок того, що подібні добавки значно збільшують вміст кисню в розплаві, який є адгезійно- та поверхнево-активною речовиною. Однак діоксид олова часто використовують для створення різних пристроїв та приладів для електротехніки та електроніки, отже додавання великої кількості міді в припій є небажаним [6].

В попередніх роботах на прикладі титанату барію, зокрема в [6], показано, що в системі (Ag—Cu)—BaTiO₃ в атмосфері чистого проточного кисню значно інтенсифікуються процеси змочування та адгезії, це дає можливість отримати досить високий ступінь змочування зі зниженням вмісту міді в розплаві. Виходячи з цього, подальші експерименти проводилися за трохи модифікованою "металокисневою" технологією: з використанням атмосфери чистого проточного кисню. Було створено спеціальну дослідну установку, схема якої представлена на рис. 5.

Експерименти по змочуванню проводилися за температури 1273 К та парціальному тискові кисню $p = 0,1$ МПа. Дані щодо змочування у кисневій атмосфері кераміки на основі діоксиду олова розплавом Ag—Cu представлені на рис. 6.

Як зазначалося раніше, кисень, розчинений в розплаві Ag—Cu, працює як сильний адгезійний та поверхнево-активний елемент. Додавання міді в розплав срібла (~10% (ат.)) сприяє значному зниженню крайових кутів змочування до 36—40 градус у повітряному середовищі та до 27—30 град — в атмосфері чистого проточного кисню.

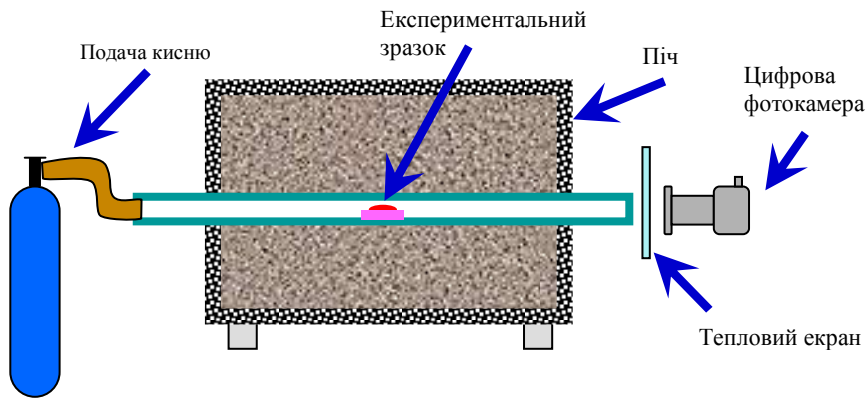


Рис. 5. Схема установки для дослідження змочування в повітряному середовищі та в атмосфері чистого кисню

Fig. 5. The scheme of the devise for study of wetting in air and in pure oxygen atmosphere

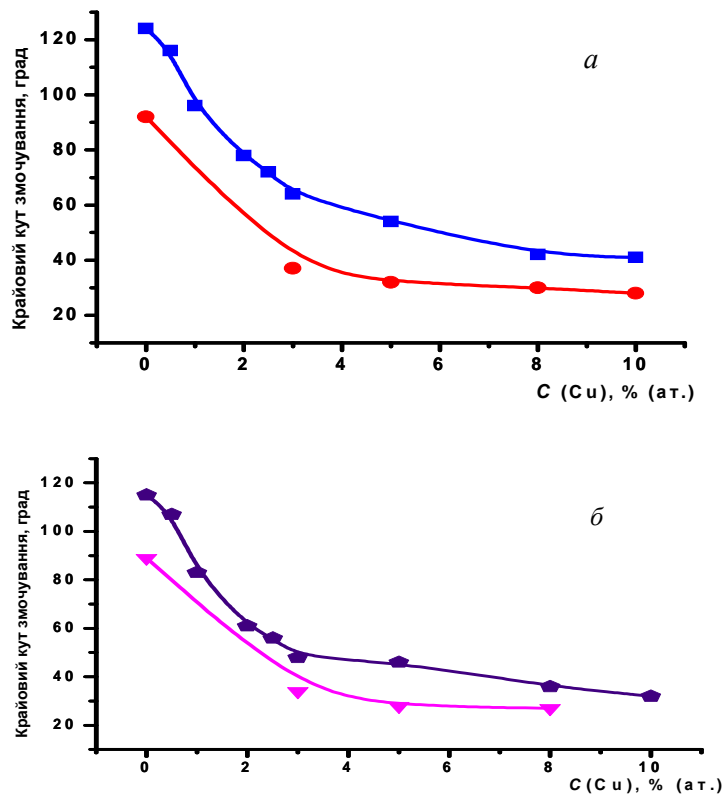


Рис. 6. Залежність крайових кутів змочування керамічних матеріалів на основі діоксиду олова SnO₂ (а) та SnO₂—1% (ат.) Fe₂O₃ (б) у повітрі (■) та чистому кисні (▼) розплавом Ag—Cu—O ($T = 1273$ K)

Fig. 6. Dependence of contact angles SnO₂ (a) and SnO₂—1% (at.) Fe₂O₃ (b) in air (■) and in pure oxygen (▼) tin dioxide based ceramic materials by Ag—Cu—O melts ($T = 1273$ K)

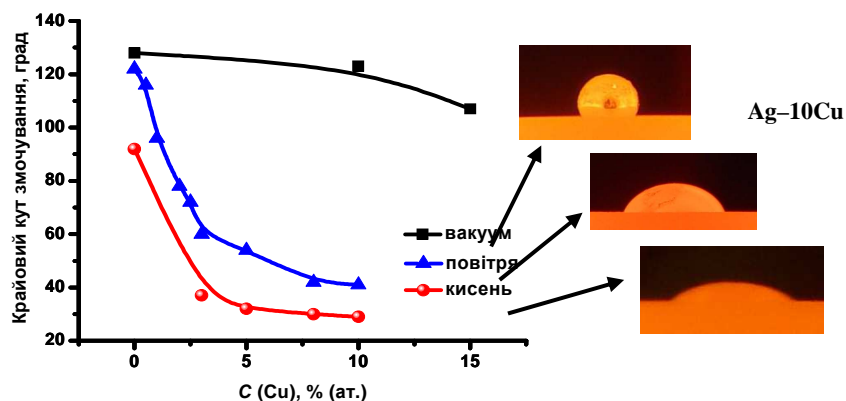


Рис. 7. Залежності крайових кутів змочування SnO₂-кераміки розплавом Ag—Cu від вмісту міді в розплаві срібла в умовах з різним парціальним тиском кисню в системі

Fig. 7. Dependences of the contact angles of SnO₂-ceramics by Ag—Cu melt at the copper content in the silver melt in conditions with different partial pressure of oxygen in the system

На рис. 7 для порівняння представлено результати експериментів по змочуванню діоксиду олова в умовах з різним парціальним тиском кисню в системі за $T = 1273$ К. Показано, що крайовий кут змочування для чистого срібла у вакуумі за температури 1273 К дорівнює 126, у повітрі — 122, а у чистому кисню — 92 град. Додавання міді в розплав сприяє зменшенню крайових кутів змочування, що є найбільш ефективним у кисневій атмосфері: вже з вмістом 5% (ат.) Cu крайовий кут змочування становить 30 град, це є достатнім для паяння керамічних матеріалів на основі діоксиду олова.

Причина високої капілярності сплавів в атмосфері чистого кисню полягає у великій рівноважній концентрації кисню в розплаві з високим парціальним тиском кисню в ньому. Для повітря парціальний тиск кисню становить 0,021 МПа, для чистого кисню — 0,1 МПа. Концентрацію кисню, яка насичує металічний розплав, можна описати відповідно до закону Сівертса [9, 18]:

$$C(\text{O})^{\text{рідкий метал}} = k\sqrt{p(\text{O}_2)}, \quad (1)$$

де k — стала; $p(\text{O}_2)$ — парціальний тиск кисню в системі.

Отже, концентрація кисню, розчиненого в розплаві срібла, у повітряному середовищі складає

$$C(\text{O})_{\text{повітря}}^{\text{Ag}} = k\sqrt{0,21}, \quad (2)$$

в атмосфері чистого кисню —

$$C(\text{O})_{\text{чистий кисень}}^{\text{Ag}} = k\sqrt{1} \quad (3)$$

Якщо співставити значення концентрацій кисню в різних газових середовищах ((2) й (3)), то можна визначити, що в атмосфері чистого кисню вона буде в 2,2 рази більша за активну концентрацію у повітрі. Для невеликих концентрацій кисню, згідно з роботою [9], його активність визначається з урахуванням ідеального розбавленого стану. Таким чином, справедливо

$$C(\text{O})^{\text{рідкий метал}} = X_{\text{O}}, \quad (4)$$

де X_{O} — мольна частка кисню в розплавленому металі.
Крім того, з урахуванням того, що

$$C(\text{O})^{\text{рідкий метал}} = \frac{P_{\text{O}_2}}{P_{\text{заг}}}, \quad (5)$$

в роботі [19] на основі закону Сівертса розрахували співвідношення між $\rho(\text{O}_2)$ й мольною часткою кисню в рідкому металі (X_{O}):

$$X_{\text{O}} = 5,773 \cdot 10^{-5} (P_{\text{O}_2})^{1/2}. \quad (6)$$

Крім того, за законом Сівертса, розчинність газів в рідких металах, пропорційна квадратному кореню з парціального тиску газу.

За даними роботи [9], тиск дисоціації Ag_2O залежить від температури:

$$\lg \rho(\text{O}_2) = -2859/T + 6,2853. \quad (7)$$

Отже, для утворення сполуки Ag_2O парціальний тиск кисню повинен бути близько 20 МПа, тоді припиняє діяти закон Сівертса. За нашими умовами, тиск кисню в системі дорівнює 0,1 МПа, тобто наші дані знаходяться в межах дії зазначеного закону.

Розчинний кисень модифікує міжфазову взаємодію, що приводить до інтенсифікації адгезійних процесів, які відбуваються на поверхнях поділу рідина—газ і тверде тіло—рідина.

На основі проведених розрахунків, а також згідно з нашими результатами, одержаними в експериментах для оксидних керамічних матеріалів (SnO_2), встановлено, що змочування металічними розплавами є в значній мірі функцією парціального тиску кисню в системі й знаходиться у досить добрій відповідності до попередніх робіт, зокрема [6, 19].

Висновки

Досліджено змочування діоксиду олова SnO_2 та деяких інших керамічних матеріалів на його основі (SnO_2 —1% (ат.) Fe_2O_3 , SnO_2 —0,5% (ат.) CuO) в газових середовищах з різним парціальним тиском кисню (повітря, чистий кисень). На повітрі крайові кути змочування SnO_2 -кераміки розплавом Ag —3% (ат.) Cu становили 60 град, в атмосфері чистого кисню вони знижуються до 37 град. В середньому капілярні характеристики в атмосфері чистого кисню покращувалися майже вдвічі, а кінцеві значення ($\theta \approx 25$ —20 град)

близькі до повного розтікання, що під час паяння матеріалів на основі діоксиду олова може приводити до значного підвищення якості паяного шва. Саме такі умови є сприятливими для формування прецизійних паяних з'єднань різного застосування, зокрема для мікроелектроніки, приладів космічного призначення тощо.

РЕЗЮМЕ. Исследованы процессы смачивания и контактного взаимодействия металлических расплавов и керамических материалов на основе диоксида олова (SnO_2 , SnO_2 —1% (ат.) Fe_2O_3 , SnO_2 —0,5% (ат.) CuO) в газовых средах (воздух, чистый проточный кислород) с различным парциальным давлением кислорода в системе. Получены концентрационные зависимости краевых углов смачивания поверхности керамических материалов для ряда металлических расплавов (Ag—Cu—O , Ag—Ge—O , Ag—Pb—O). Изучена микроструктура зоны контакта керамика—металл.

Ключевые слова: диоксид олова, смачивание, контактное взаимодействие, кислородсодержащая газовая среда.

1. *Найдич Ю. В.* Вплив електронегативних елементів на змочування та паяння іонних та іонноковалентних керамічних матеріалів металевими розплавами / [Ю. В. Найдич, В. П. Красовський, О. В. Дуров, Т. В. Сидоренко] // Адгезия расплавов и пайка материалов. — 2016. — Вып. 49. — С. 3—21.
2. *Naidich Y. V.* Advance in the theory of ceramic/liquid metal systems wettability. Peculiarity of contact processes for transition and non-transition metals // Адгезия расплавов и пайка материалов. — 2013. — Вып. 46. — С. 3—62.
3. *Naidich Yu. V.* The wettability of solids by liquid metals // Progress Surface Membrane Sci. — 1981. — **14**. — P. 353—484.
4. *O'Brian T. E.* Effect of oxygen on the reaction between copper and sapphire / T. E. O'Brian, A. C. Chaklader // J. Amer. Ceram. Soc. — 1974. — **57**, No. 8. — P. 323—333.
5. *Durov O. A.* Wetting of some nonstoichiometric oxide ceramic materials by liquid metals. / O. A. Durov, Y. V. Naidich, T. V. Sydorenko // Proc. E-MRS Fall Meeting. — 2012. — P. 184—189.
6. *Найдич Ю. В.* Адгезия и контактное взаимодействие металлических расплавов с титанатом бария и другими перовскитными материалами / Ю. В. Найдич, Т. В. Сидоренко. — К. : Наук. думка, 2003. — 156 с.
7. *Naidich Yu. V.* Wettability and brazing of iono-ionocovalent ceramic materials by metal alloys containing electronegative elements / [Yu. V. Naidich, V. P. Krasovskyy, O. V. Durov, T. V. Sydorenko] // Proc. of 6th Int. Brazing and Soldering conf. — Long Beach, CA, USA, 2015. — P. 40—48.
8. *Некрасов Б. В.* Основы общей химии. — М. : Химия, 1973. — Т. 2. — 688 с.
9. *Фром Е.* Газы и углерод в металлах / Е. Фром, Е. Гебхардт. — М. : Металлургия, 1980. — 712 с.
10. *Найдич Ю. В.* Поверхностные явления в металлах. — Нальчик : Кабардино-Балкарский ун-т, 1965. — С. 30—39.

11. *Найдич Ю. В.* Смачивание диоксида олова расплавами серебро—медь в воздушной среде / Ю. В. Найдич, Т. В. Сидоренко, Б. К. Лупин // Адгезия расплавов и пайка материалов. — 2015. — Вып. 48. — С. 11—14.
12. *Найдич Ю. В.* Контактные явления в металлических расплавах. — Киев : Наук. думка, 1972. — 196 с.
13. *Бурсиан Э. В.* Нелинейный кристалл (титанат бария). — М. : Наука, 1974. — 295 с.
14. *Shen P.* Wettability of polycrystalline rutile TiO_2 by molten Al in different atmospheres / P. Shen, H. Fujii, K. Nogi // Acta Materialia. — 2006. — **54**. — P. 1559—1569.
15. *Дуров О. В.* Смачивание и контактное взаимодействие материалов на основе диоксида циркония с металлическими расплавами: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2004. — 26 с.
16. *Ommer M.* Wetting phenomena in Ag-based contact materials / [M. Ommer, U. E. Klotz, I. Fallheier et al.] // VI Int. conf. High Temperature Capillarity, Athens, 2009. — P. 158.
17. *Денисов В. М.* Смачивание керамик на основе SnO_2 некоторыми металлами / [В. М. Денисов, Л. Т. Антонова, В. П. Ченцов и др.] // Расплавы. — 2008. — № 1. — С. 3—7.
18. *Есин О. П.* Физическая химия пирометаллургических процессов / О. П. Есин, П. В. Гельд. — М. : Metallurgia, 1966. — Т. 2. — 704 с.
19. *Muolo M. L.* Oxygen influence on ceramics wettability by liquid metals: Ag/ α - Al_2O_3 — Experiments and modeling / [M. L. Muolo, F. Valenza, A. Passerone, D. Passerone] // Mater. Sci. Engineering A. — 2008. — **495**, is. 1—2. — P. 153—158.

Надійшла 15.09.18

Sydorenko T. V., Poluyanska V. V., Naidich Yu. V.

The effect of partial pressure of oxygen on the wetting processes and contact interactions in metal melts/ SnO_2 -ceramics systems

The wetting processes and contact interaction of metal melts and ceramic materials based on tin dioxide (SnO_2 , SnO_2 —1% (at.) Fe_2O_3 , SnO_2 —0,5% (at.) CuO) were studied in gaseous environments with different partial pressure of oxygen in the system (air, pure oxygen). The concentration dependences of the wetting contact angles of ceramic surfaces for a number of metal melts (Ag—Cu, Ag—Ge, Ag—Pb) with oxygen dissolved in them to equilibrium state were obtained. The microstructure of the ceramic-metal contact zone was investigated.

Keywords: tin dioxide, wetting, contact interaction, oxygen-containing gaseous environments.