

# Адгезія розплавів і пайка матеріалів

---

УДК 548.52

<https://doi.org/10.15407/materials2021.03.109>

## Змочування у вакуумі та контактна взаємодія деяких металічних розплавів з оксидами індію та олова

М. Ф. Григоренко\*, Т. В. Сидоренко, Є. П. Черніговцев,  
О. В. Дуров, В. В. Полуянська, Т. Б. Коноваленко

Інститут проблем матеріалознавства імені І. М. Францевича НАН України  
Україна, 03142, Київ, вул. Кржижановського, 3

\*E-mail: [superngrig@ukr.net](mailto:superngrig@ukr.net)

*Досліджено капілярні властивості у вакуумі оксидів індію та олова. Встановлено особливості їх змочування та міжфазової взаємодії під час контакту з чистими металами і деякими сплавами. Отримано часові та температурні залежності крайових кутів змочування. Показано, що для діоксиду олова вплив температури експерименту та часу витримки є більш суттєвим, ніж це спостерігалось для оксиду індію. Проаналізовано термодинамічний стан системи в процесі змочування. Вивчено мікроструктуру зони контакту кераміка—металічний розплав.*

**Ключові слова:** оксид індію, діоксид олова, напівпровідник, змочування, контактна взаємодія, металічний розплав.

### Вступ

Завдяки унікальній комбінації електричних та оптичних властивостей такі напівпровідникові оксиди, як діоксид олова та оксид індію, є вельми перспективними багатофункціональними матеріалами для цілого ряду галузей техніки та створення широкого спектра мікроелектронних приладів. Актуальною проблемою сучасної напівпровідникової техніки та енергетики є розробка, створення та дослідження тонкоплівкових елементів, зокрема формування та вивчення напівпровідникових прозорих провідних шарів на основі оксиду індію, чому в останні роки приділяється значна увага. Зокрема, оксид індію широко використовується для створення прозорих тепловідбивних покриттів, як гетеропереходи сонячних комірок, газові датчики, захисні покриття та прозорі електроди у пристроях оптоелектроніки тощо [1]. Діоксид олова також має широке практичне застосування у різних технічних галузях [2]. Так, наприклад, композити Ag—SnO<sub>2</sub> є електроконтактними матеріалами з високою здатністю до дугогасіння, плівки SnO<sub>2</sub> застосовуються як ефективні газові сенсори, покриття SnO<sub>2</sub> знижує тертя та знос деяких матеріалів (коефіцієнт тертя змінюється в діапазоні 0,3—0,03) тощо.

Експериментальні дослідження подібних матеріалів являють очевидний інтерес з точки зору фізики, хімії твердого тіла, фізикохімії поверхні, матеріалознавства, оскільки дозволяють визначити, наприклад, як енергетичні характеристики та фізичні параметри створюваних приладів, так і вдосконалити вже існуючі технології формування плівок високої якості, оскільки властивості прозорих оксидних плівок сильно залежать від умов їх одержання й торкаються найважливіших проблем сучасної мікроелектроніки.

Важливі дослідження, зокрема в плані розробки способів з'єднання, приєднання електроконтактів до матеріалів на основі оксидів індію та олова, наприклад, методом паяння, включають вивчення змочування оксидів індію та олова різними металами та сплавами. Наскільки нам відомо, дані щодо змочування зазначених оксидів (особливо це стосується оксиду індію) металами в літературі практично відсутні. Існують лише поодинокі експериментальні дослідження, наприклад роботи [3, 4], що виконані для одного чи двох металів в обмежених температурно-газових умовах. Останнім часом нами було проведено низку експериментальних робіт по дослідженню адгезійних і капілярних властивостей SnO<sub>2</sub> [5, 6]. Але фундаментальні закономірності адгезійної взаємодії метал—оксид індію або олова ще остаточно не встановлені.

Отже, метою представленої роботи є отримання експериментальних даних щодо адгезії та ступеня змочування оксидів індію та олова різними металами та сплавами в умовах вакууму, вивчення мікроструктури зони контакту та механізму процесів на міжфазних границях оксид—метал.

### **Методика експерименту та матеріали**

Експерименти по змочуванню кераміки на основі діоксиду олова та порошкових підкладок In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> розплавами чистих металів проводилися за методом “лежачої краплі”, який був детально описаний в роботах [7—9]. Досліди здійснювали у вакуумі ~6,7·10<sup>-4</sup> МПа у вакуумній установці (рис. 1) з фіксацією процесу змочування за допомогою фото- та відеокамер.

Для експериментів по змочуванню застосовувались зразки кераміки, що спікалися з полікристалічного порошку SnO<sub>2</sub>. Залежно від складу шихти та режиму спікання можна отримати два типи такої кераміки — високопористу та високощільну [10]. Для експериментів по змочуванню у вакуумі нами було використано спеціально синтезовану високощільну кераміку на основі діоксиду олова, яку отримували, додаючи малу кількість домішок іншого оксиду [11]. Отже, в даному випадку використовували суміш порошків SnO<sub>2</sub> (марки “чистий для аналізу”) та 1% (мас.) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, яку відпресовували за тиском 40 МПа, а потім спікали у повітрі за температури 1673 К протягом 2 годин. Отримані зразки кераміки мали поруватість близько 5%. Подібний керамічний матеріал може бути застосований, наприклад, як основа для високотемпературних електродів для створення приладів. Керамічні зразки діаметром 20 мм і товщиною 3 мм були заздалегідь відшліфовані та відполіровані (шорсткість поверхні складала 0,08 мкм).

Зразки In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> пресували із порошку оксиду індію марки “хімічно чистий” під тиском ( $P = 500$  МПа) на повітрі з використанням розчину метилнітроцелюлози в етилацетаті як біндера. Досліди проводили за температур від точки плавлення певного металу або сплаву до ~773 К.

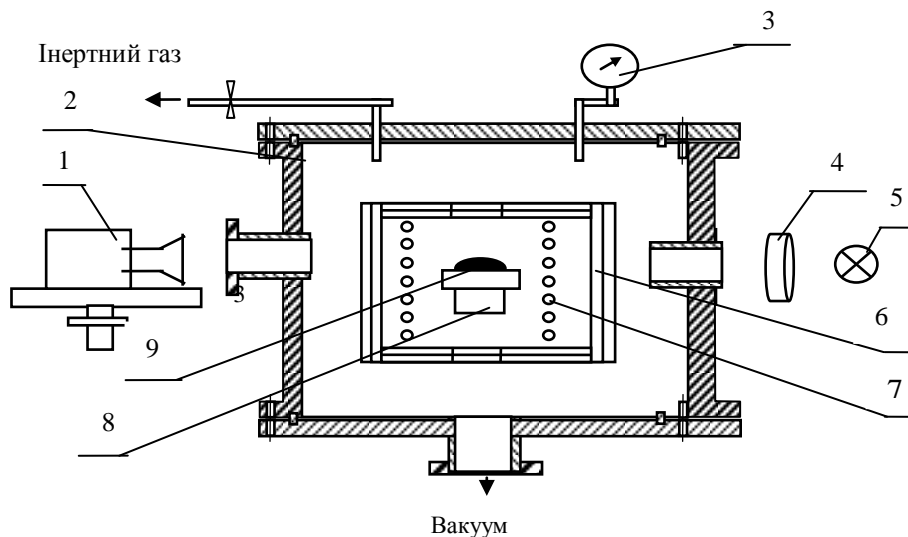


Рис. 1. Схема вакуумної установки для плавлення/синтезу металів: 1 — фото- або відеокамера; 2 — вакуумна камера; 3 — манометр; 4 — конденсор; 5 — освітлювальна лампа; 6 — екран; 7 — нагрівач; 8 — столик; 9 — підкладка (тигель) з краплею металу [8].

Досліджувані метали мали чистоту не гірше 99,99%. Бінарні сплави Ag—Cu з різним вмістом міді (від 10 до 80% (ат.)) отримували нагріванням безпосередньо в ході експерименту в процесі контакту вихідних металів на поверхні твердої фази. Також застосовували промисловий сплав ПОС-61 (припій олов'яно-свинцевий, 61,9% (мас.) Sn), який зазвичай використовується як низькотемпературний припій.

### Результати експериментів та їх обговорення

Змочування та контактна взаємодія  $\text{In}_2\text{O}_3$  та  $\text{SnO}_2$  з чистими металами (Ga, In, Sn, Au, Ag, Cu) та деякими бінарними сплавами вивчалися у вакуумі в діапазоні температур плавлення цих металів або сплавів. Особливість експериментів по змочуванню металевими розплавами субстрату з оксиду індію обумовлена тим, що через можливу сублімацію та розклад оксиду в вакуумі [12—16] діапазон температур, а отже й спектр досліджуваних металів і сплавів, було суттєво обмежено. Досліди на поверхні  $\text{In}_2\text{O}_3$  проводилися починаючи від температури плавлення металу/сплаву до приблизно 773 К. Отримані значення крайових кутів змочування металічних розплавів на поверхні оксидів індію та олова за певних температур представлені в табл. 1.

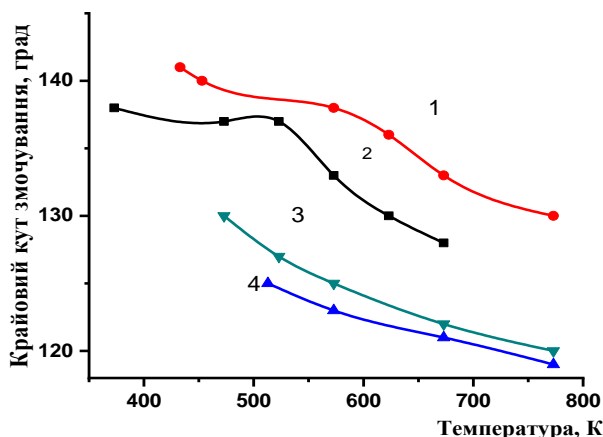
Як свідчать дані експериментальних досліджень у вакуумі, більшість чистих металів не змочують поверхню як оксиду індію, так і діоксиду олова ( $\theta > 90$  град).

Встановлено, що на поверхні оксиду індію крайові кути змочування для усіх вивчених металів змінюються з температурою у незначній мірі в досить вузькому інтервалі значень (рис. 2—5). Наприклад, для галію крайові кути змінюються від 138 до 128 град, для індію — від 140 до 130 град, демонструючи, в цілому, низький ступінь змочування порошкових пресованих підкладок оксиду індію дослідженими металами та сплавами.

**Т а б л и ц я 1. Результати змочування оксидів індію та олова деякими чистими металами та сплавами у вакуумі**

Метал або сплав	Температура експерименту, К	Крайовий кут змочування металом поверхні оксиду, град	
		In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SnO <sub>2</sub>
Ga	373	138	
	473	137	144
	523	137	
	573	133	
	623	130	
	673	128	
	1073		110
	1173		25
In	433	141	
	453	140	142
	573	138	
	623	136	
	673	133	
	773	130	
	1073		120
	1173		80
Sn	1273		30
	513	125	140
	573	123	
	673	121	
	773	119	
	873		140
	973		138
	1073		92
	1173		68
	1273		66
1323		56	
Au	1273		125
Ag	1273		124
Cu	1373		52
	1383		52
Ag—10% (ат.) Cu	1273		117
Ag—20% (ат.) Cu	1273		114
Ag—40% (ат.) Cu	1273		80
Ag—60% (ат.) Cu	1273		73
Ag—80% (ат.) Cu	1273		70
ПОС-61 (61,9% (мас.) Sn)	473	130	
	523	127	
	573	125	
	673	122	
	773	120	

Рис. 2. Температурна залежність крайового кута змочування  $\text{In}_2\text{O}_3$  розплавленими металами та сплавами у вакуумі: 1 — індій; 2 — галій; 3 — ПОС-61; 4 — олово.



Завдяки можливості дослідити змочувальну поведінку діоксиду олова за більш високих (ніж для  $\text{In}_2\text{O}_3$ ) температур було виявлено, що мідь та олово, на відміну від більшості металів, змочують поверхню  $\text{SnO}_2$ -кераміки (рис. 6). Крім того, в процесі контакту деяких металів (олова, германію, індію) з поверхнею діоксиду олова у вакуумі за високих температур має місце досить інтенсивна хімічна взаємодія.

Для міді спостерігається досить специфічна поведінка: у вакуумі за температури 1373 К рідкий метал розтікається по поверхні  $\text{SnO}_2$ , утворюючи крайовий кут 52 град. Щоб більш детально дослідити цей процес, вивчено кінетику розтікання  $\text{Cu}$  по поверхні діоксиду олова (рис. 6). Було показано, що на значення крайових кутів змочування суттєвий вплив спричиняють температура експерименту та час витримки.

Так, вихідні крайові кути змочування міддю  $\text{SnO}_2$ -кераміки за температури 1373 К становлять 95 град. Після витримки зразків за даних умов на протязі близько 10 хв крайовий кут зменшується до 70 град. Кінцеве значення крайового кута (52 град) встановлюється вже після витримки на протязі 30 хв (рис. 7).

В процесі високотемпературного нагрівання у вакуумі можливий частковий розклад  $\text{SnO}_2$  та утворення нестехіометричного  $\text{SnO}_{2-x}$  і навіть  $\text{SnO}$ . Отже, видалення кисню ефективно відбувається не лише з поверхні, а й з кристалічної ґратки. Кисень з підкладки розчиняється в розплавленій

Рис. 3. Крапля розплаву олова на поверхні підкладки  $\text{In}_2\text{O}_3$  за температур 573 (а) та 673 К (б).

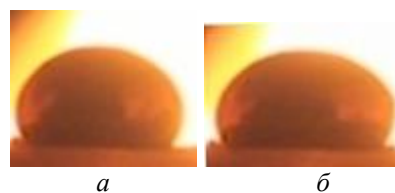


Рис. 4. Крапля розплаву галію на поверхні підкладки  $\text{In}_2\text{O}_3$  за температур 573 (а), 623 (б) та 673 К (в).



Рис. 5. Крапля розплаву індію на поверхні підкладки  $\text{In}_2\text{O}_3$  за різних температур (К): *a* — 493; *б* — 673; *в* — 723; *г* — 773.

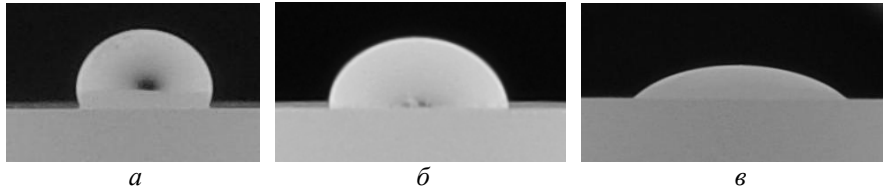


Рис. 6. Рідкі краплі металів на поверхні діоксиду олова: *a* — срібло (1273 К); *б* — мідь (1373 К); *в* — олово (1073 К).

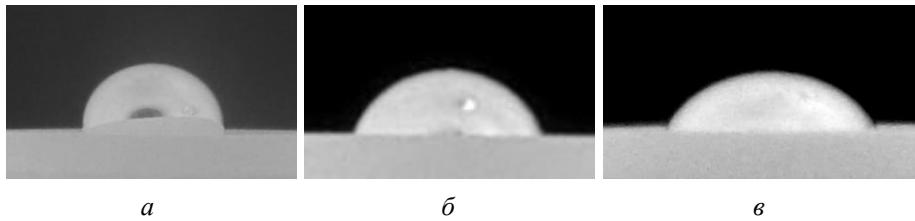


Рис. 7. Рідкі краплі розплавленої міді на поверхні  $\text{SnO}_2$ -кераміки за температури 1373 К та різних витримок (хв): *a* — 0; *б* — 10; *в* — 30.

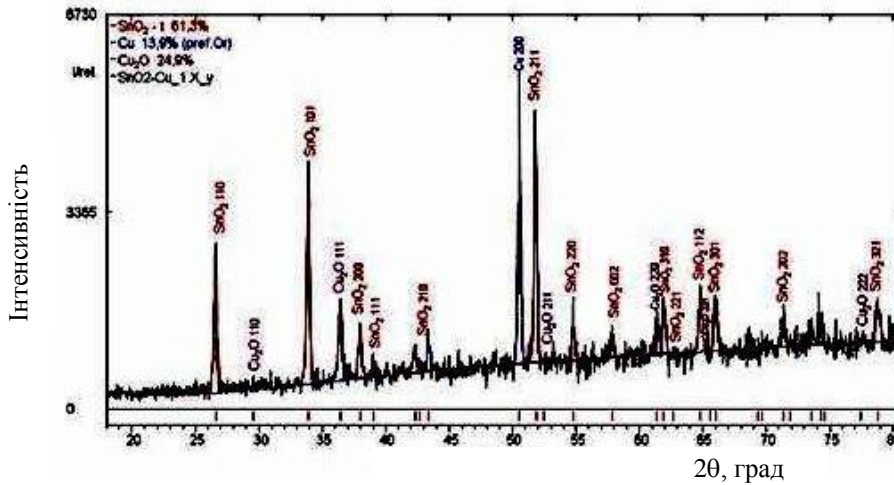


Рис. 8. Дифрактограма суміші порошків міді та  $\text{SnO}_2$  після відпалу у вакуумі за температури 1423 К протягом 30 хв.

міді й діє як адгезійно-активна добавка, знижуючи її поверхневий натяг (з  $1370 \text{ мДж/м}^2$  для чистої міді до  $530$  — для розплаву  $\text{Cu}$ , який містить  $0,88\%$  (мас.) кисню), що може зумовлювати значне зменшення крайового кута змочування [17].

Проведено рентгеноструктурне дослідження системи  $\text{Cu-SnO}_2$ , для чого змішували порошки  $\text{SnO}_2$  та міді, після чого суміші відпресовували та

відпалювали у вакуумі за температури 1423 К протягом 30 хв. Отримані спечені зразки вивчали за методом рентгенівської дифрактометрії, відповідні дифрактограми представлені на рис. 8.

У системі після відпалу були присутні фази міді, оксиду олова та оксиду міді. Це підтверджує припущення, що змочування SnO<sub>2</sub> мідним розплавом забезпечується термічною дисоціацією SnO<sub>2</sub> з подальшим розчиненням утвореного кисню у міді, оскільки адсорбція CuO на міжфазній поверхні сприяє підвищенню адгезії.

Досліджено також температурну та часову залежності змочування SnO<sub>2</sub>-кераміки розплавом чистого олова. На рис. 9 наведено результати експериментів. Показано, що в інтервалі температур 513—1073 К олово не змочує поверхню кераміки ( $\theta > 90$  град), це узгоджується з даними роботи [18].

Залежність крайового кута змочування в системі SnO<sub>2</sub>—Sn від температури є нелінійною, що може свідчити про хімічну взаємодію розплаву з підкладкою. Розрахунок зміни енергії Гіббса для реакції показав, що ймовірність перебігу такого процесу суттєво залежить від температури експерименту (табл. 2).

Співставлення цих даних з результатами по змочуванню SnO<sub>2</sub> рідким оловом (рис. 9) виявило певну кореляцію: для позитивних значень  $\Delta G^0$  реалізується погане змочування, для негативних, тобто в ході реакції



спостерігається поліпшення змочування в системі. Враховуючи значення  $\Delta G$  реакцій, що можуть протікати на адгезійних границях у ході контакту SnO<sub>2</sub> з деякими іншими металами (наприклад, германієм і кремнієм),



подібні метали можуть бути використані як адгезійно-активні добавки до сплавів, які є основою припоїв (для реакції (3) за температури 1373 К  $\Delta G^0 = -376$  кДж/моль) [19].

Відомо, що бінарний сплав срібло—мідь часто застосовується для паяння неорганічних матеріалів як припій або як основа багатьох припоїв. Тому було досліджено змочування керамічного діоксиду олова системою Ag—Cu з різним вмістом міді. Отриману концентраційну залежність крайових кутів змочування керамічного діоксиду олова представлено на рис. 10. Показано, що додавання міді до розплаву срібла зменшує крайовий кут змочування на поверхні SnO<sub>2</sub>, але досягти оптимального для паяння ступеня змочування (30—40 град) все ж таки не вдалося.

**Т а б л и ц я 2.** Зміна енергії Гіббса  $\Delta G$  реакції утворення SnO залежно від температури експерименту [18]

<i>T</i> , К	$\Delta G$ , кДж/моль
773	2,4
873	1,9
973	1,3
1073	0,6
1173	-0,08
1273	-0,86
1373	-1,71
1473	-2,26
1573	-3,64

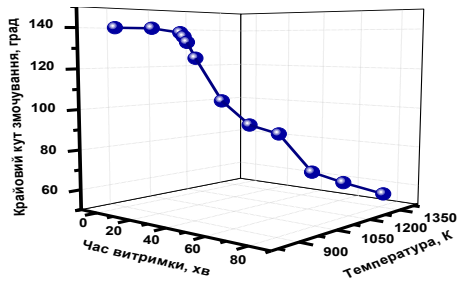


Рис. 9. Залежності крайового кута змочування від температури та часу витримки для системи SnO<sub>2</sub>—Sn.

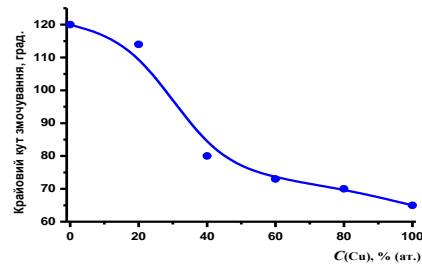


Рис. 10. Залежність крайового кута змочування поверхні SnO<sub>2</sub> від вмісту міді в розплаві срібла (1373 К).

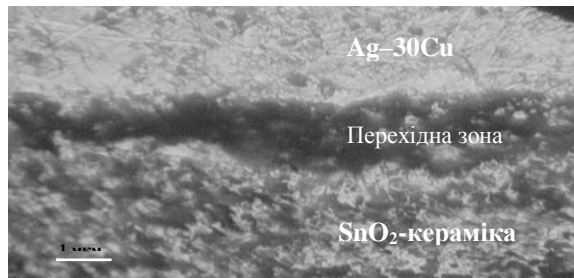


Рис. 11. Мікроструктура зони контакту SnO<sub>2</sub>-кераміка/ розплав Ag—30Cu.

Також вивчено мікроструктуру зони контакту металевого розплаву Ag—30Cu з керамічним діоксидом олова (рис. 11). Показано, що на міжфазовій границі формується темний, досить неоднорідний перехідний шар товщиною близько 1 мкм, який містить велику кількість міді, котра, в свою чергу, сприяє покращенню змочування. Але, як показали дослідження, цього недостатньо для отримання міцного контакту. Незважаючи на це і враховуючи аномальну поведінку чистої міді в процесі контакту з поверхнею SnO<sub>2</sub>-кераміки в вакуумі за високих температур, система срібло—мідь, а також інші системи на основі міді можуть бути перспективними для створення припоїв з додаванням адгезійно-активних компонентів.

### Висновки

Враховуючи важливість і широкий спектр використання керамічних матеріалів на основі оксиду індію та діоксиду олова, досліджено змочування та міжфазову взаємодію з розплавленими металами та деякими сплавами зазначених оксидних систем. Проведено аналіз отриманих даних на основі термодинамічних розрахунків та вивчено мікроструктуру зони контакту кераміка—металевий розплав.

Експериментальні дані по змочуванню в вакуумі чистими металами (Ga, In, Sn, Au, Ag, Cu) показали, що більшість чистих металів не змочує досліджені нами оксиди. На значення крайових кутів змочування впливає температура експерименту та час витримки. Отримано температурні та часові залежності крайових кутів змочування металічних розплавів на поверхні In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та SnO<sub>2</sub>. Для діоксиду олова подібний вплив є більш суттєвим, ніж це спостерігалось для оксиду індію. Це може бути обумовлене тим, що за більш високих температур змінюється стабільність оксидів і перебіг хімічних процесів на міжфазній границі відбувається



більш інтенсивно. Змочування поверхні SnO<sub>2</sub> розплавом срібло—мідь з різним вмістом міді виявилось недостатнім для застосування його як припою для подібної кераміки, але використання цієї системи як основи для додавання адгезійно-активного компонента для створення припоюної композиції є перспективним напрямком подальших досліджень.

#### Цитована література

1. Григоренко М.Ф., Черніговцев Є.П. Властивості, структура, способи одержання матеріалів на основі оксиду індію та їх практичне застосування у технологіях напівпровідникової та електронної техніки (огляд). *Адгезія расплавов и пайка материалов*. 2019. Вып. 52. С. 45—61.
2. Сидоренко Т.В., Полуянська В.В. Діоксид олова: будова, властивості, застосування та перспективи подальшого дослідження його капілярних властивостей. *Адгезія расплавов и пайка материалов*. 2015. Вып. 48. С. 15—48.
3. Денисова Л.Т., Биронт В.С., Денисов В.М. О катастрофическом окислении расплавов Ag—Sn. *J. Siberian Federal University: Engineering and Technologies*. 2009. Vol. 3. P. 283—293.
4. Ommer M., Klotz U.E., Fallheier I. Wetting phenomena in Ag—based contact materials. *VI Internat. conf. High Temperature Capillarity, Athens*. 2009. P. 158.
5. Сидоренко Т.В., Полуянська В.В., Найдич Ю.В. Вплив парціального тиску кисню на процеси змочування та контактної взаємодії в системах, що містять металічні розплави та кераміку на основі діоксиду олова. *Адгезія расплавов и пайка материалов*. 2018. Вып. 51. С. 3—13.
6. Durov O., Sydorenko T., Poluyanskaya V., Karpets M. Wetting, interfacial interactions, and vacuum metallization of SnO<sub>2</sub> ceramics by liquid metals and alloys. *J. Mater. Eng. Perform.* 2020. Vol. 29 (8). P. 4922—4927.
7. Найдич Ю.В. Контактные явления в металлических расплавах. К.: Наук. думка, 1972. 196 с.
8. Naidich Yu.V. *Progress in Surface Membrane Science*. New York: Academic Press, Inc., 1981. P. 353—484.
9. Найдич Ю.В., Сидоренко Т.В. Адгезия и контактное взаимодействие металлических расплавов с титанатом бария и другими перовскитными материалами. К.: Наук. думка, 2013. 156 с.
10. Найдич Ю.В., Сидоренко Т.В., Лупин Б.К. Смачивание диоксида олова расплавами серебро—медь в воздушной среде. *Адгезія расплавов и пайка материалов*. 2015. Вып. 48. С. 11—14.
11. Гедакян Д.А., Григорян Л.Т., Костанян К.А., Мкртчян Л.А. Физика спекания легированной окиси олова. *Стекло и керамика*. 1976. № 12. С. 24—26.
12. *Химическая энциклопедия: В 5 т. Т. 2*. Москва: Большая советская энциклопедия, 1990. 671 с.
13. Лидин Р.А. Химические свойства неорганических веществ: Учеб. пособие для вузов. 3-е изд. Москва: Химия, 2000. 480 с.
14. Никольский Б.П. Справочник химика. 2-е изд. Москва—Ленинград: Химия, 1966. Т. 1. 1072 с.
15. Никольский Б.П. Справочник химика. 3-е изд. Ленинград: Химия, 1971. Т. 2. 1168 с.
16. Рипан Р., Четьяну И. Неорганическая химия. Химия металлов. Москва: Мир, 1971. Т. 1. 561 с.
17. Ивановская М.И., Оводок Е.А. Изучение природы парамагнетизма в SnO<sub>2</sub>. *Северодовские чтения*. Минск: БГУ, 2014. С. 65—88.
18. Денисов В.М., Антонова Л.Т., Ченцов В.П. Смачивание керамик на основе SnO<sub>2</sub> некоторыми металлами. *Расплавы*. 2008. № 1. С. 3—7.
19. Електронний ресурс: <http://www.crct.polymtl.ca/fact./documentation/SGnucl/O-Sn>

#### References

1. Grigorenko, M., Chernigovtsev, E. (2019). Properties, structure, methods of obtaining of the indium oxide based materials and their practical use in the semiconductor and electronic technique (review). *Adgeziya rasplavov i paika materialov*, Вып. 52, pp. 45—61 [in Ukrainian].
2. Sydorenko, T. V., Poluyanskaya, V. V. (2015). Tin dioxide: structure, properties, applications and perspective of further study of capillary properties (review). *Adgeziya rasplavov i paika materialov*, Вып. 48, pp. 15—48 [in Ukrainian].
3. Denisova, L. T., Biron, V. S., Denisov, B. M. (2009). On the catastrophic oxidation of Ag—Sn melts. *J. Siberian Federal University: Engineering and Technologies*, Vol. 3, pp. 283—293 [in Russian].
4. Ommer, M., Klotz, U. E., Fallheier, I. (2009). Wetting phenomena in Ag—based contact materials, VI Int. conf. High Temperature Capillarity, Athens. P. 158.

5. Sydorenko, T. V., Poluyanska, V. V., Naidich, Yu. V. (2018). The effect of partial pressure of oxygen on the wetting processes and contact interactions in metal melts/SnO<sub>2</sub>-ceramics systems. *Adgeziya rasplavov i paika materialov*, Vyp. 51, pp. 3—13 [in Ukrainian].
6. Durov, O., Sydorenko, T., Poluyanskaya, V., Karpets, M. (2020). Wetting, interfacial interactions, and vacuum metallization of SnO<sub>2</sub> ceramics by liquid metals and alloys. *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 29 (8), pp. 4922—4927 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05043-x>
7. Naidich, Yu. V. (1972). *Contact phenomena in metal melts*. K.: Nauk. dumka, 196 p. [in Russian].
8. Naidich, Yu. V. (1981). *Progress in Surface Membrane Science*. New York: Academic Press, Inc., pp. 353—484. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-571814-1.50011-7>
9. Naidich, Yu. V., Sydorenko, T. V. (2013). Adhesion and contact interaction of metal melts with barium titanate and other perovskite materials. K.: Nauk. dumka, 156 p. [in Russian].
10. Naidich, Yu. V., Sydorenko, T. V., Lupin, B. K. (2015). Wetting of tin dioxide ceramics by Ag—Cu—O melts in the air. *Adgeziya rasplavov i paika materialov*, Vyp. 48, pp. 11—14 [in Russian].
11. Gedakyan, D. A., Grigoryan, L. T., Kostanyan, K. A., Mkrtchyan, L. A. (1976). Sintering physics of doped tin oxide. *Steklo i keramika*, Vyp. 12, pp. 24—26 [in Russian].
12. *Himicheskaia enciklopedia: in 5 v. Vol. 2.* (1990). Moscow: Bolchaia sovskaia enciklopedia, 671 p. [in Russian].
13. Lidin, P. A. (2000). *Chemical properties of inorganic substances: Uchebn., posobie dlia vusov.* 3 ed. Moscow: Chemical, 480 p. [in Russian].
14. Nikolsky, B. P. (1966). *Spravochnik himika.* 2 ed. Moscow–Leningrad: Chemical, Vol. 1, 1072 p. [in Russian].
15. Nikolsky, B. P. (1971). *Spravochnik himika.* 3 ed. Leningrad: Chemical, Vol. 2, 1168 p. [in Russian].
16. Ripan, R., Chetyanu, I. (1971). *Neorganicheskaia himia. Himia metalov.* Moscow: Mir, Vol. 1, 561 p. [in Russian].
17. Ivanovskaya, M. I., Ovodok, E. A. (2014). Study of the nature of paramagnetism in SnO<sub>2</sub>. *Sviridovskie chtenia: sb. st.* Minsk: BSU, pp. 65—88 [in Russian].
18. Denisov, V. M., Antonova, L. T., Chentsov, V. P. (2008). Wetting of SnO<sub>2</sub>-based ceramics with some metals. *Rasplavi*, No. 1, pp. 3—7 [in Russian].
19. Electronic resource: <http://www.crct.polymtl.ca/fact./documentation/SGnucl/O-Sn>

### **Vacuum wetting and contact interaction of some of the metallic melts with indium and tin oxides**

M. Grigorenko\*, T. Sydorenko, E. Chernigovtsev, O. Durov,  
V. Poluyanska, T. Konovalenko

I. M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine

\*E-mail: [superngrig@ukr.net](mailto:superngrig@ukr.net)

*Due to the unique combination of electric and optical properties such semiconductor oxides as tin and indium oxides are very perspective multifunctional materials for variety of microelectronic devices production. Experimental studies of these materials allow to define, for example energetic characteristics of the devices created and also to improve existing technologies of films formation, joining of electrocontacts to tin and indium oxides based materials by way of brazing which require additional wetting studies. It should be noted that data on wetting of mentioned oxides by metals are practically absent in literature. Thus a detailed study of the interfacial interaction, adhesion and wetting of ceramic SnO<sub>2</sub> and In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> materials with some pure metal melts in vacuum was performed by the sessile drop method using foto- and video- fixing including concentration, temporal and temperature dependences of contact angles. It was found that most of the pure metals studied don't wet SnO<sub>2</sub> ceramics. However rather intense chemical interaction took place in vacuum at high temperatures in contact of some metals (Sn, Ge, In) with surface of SnO<sub>2</sub>. It was also shown the effect of the experiment temperature and hold-up time on the values of contact angles. Wetting angles for powdery pressed specimens of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in the temperature range studied don't change noticeably and vary in a narrow range. For example, for Ga wetting angles vary from about 138 to 128 deg and for Sn — 125—119 deg, Wetting of SnO<sub>2</sub> surface with Ag—Cu melt with different copper content was shown to be insufficient to use it as a brazing alloy, yet this system can be used as a basis for creating a brazing composition.*

**Keywords:** *indium oxide, tin dioxide, semiconductor, wetting, contact interaction, metal melt*