

PACS numbers: 68.35.bd, 68.37.Hk, 68.47.De, 68.55.-a, 81.20.Vj, 81.40.Ef

Вплив відпалу у вакуумі на диспергування тонких подвійних нікелево-мідних плівок, нанесених на оксидні керамічні матеріали

I. I. Gab, T. V. Stetsyuk, B. D. Kostyuk

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

Досліджено кінетику диспергування тонких нікелево-мідних подвійних плівок, нанесених на лейкосапфір, алюмооксидну та діоксидноцирконієву кераміку та відпалених у вакуумі за температур до 1100°C впродовж різних термінів витримки за кожної температури (від 5 до 20 хв). Подвійні плівки складалися з двох шарів. Перший металізований шар являв собою нікелеву наноплівку завтовшки 150 нм, нанесену на поверхню оксиду. На неї було нанесено другий мідний шар завтовшки 1,5 мкм, який мав слугувати лютцем для з'єднання між собою металізованих оксидних зразків. Виявлено, що ці плівки залишаються досить щільними під час нетривалого нагрівання їх до 1050°C, а після відпалу за температури 1100°C розпадаються відразу на окремі краплі, які вкривають більше половини площі оксидних підкладок. Побудовано кінетичні криві диспергування плівок на всіх оксидах у залежності від температури відпалу та часу витримки за кожної температури та розроблено дві технології з'єднання даних металізованих оксидів зварюванням тиском та лютуванням.

Ключові слова: кінетика диспергування, нікелево-мідна подвійна плівка, відпал, оксидний матеріал.

The kinetics dispersion of thin nickel–copper double films deposited onto

Corresponding author: I. I. Gab
E-mail: gab@ipms.kiev.ua

*Frantsevich Institute for Materials Science Problems of N.A.S. of Ukraine,
3 Krzhizhanovskogo Str., 03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: I. I. Gab, T. V. Stetsyuk, and B. D. Kostyuk, Influence of Annealing in Vacuum on Dispersion of Thin Double Nickel–Copper Films Deposited onto Oxide Ceramic Materials, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 8: 1093–1105 (2020) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.42.08.1093](https://doi.org/10.15407/mfint.42.08.1093).

leucosapphire, alumina and zirconia ceramics and annealed in vacuum at temperatures up to 1100°C at different exposure intervals at each temperature (from 5 to 20 min) is studied. The double films consisted of two layers: the first metallized layer is a nickel nanofilm 150 nm thickness deposited onto oxide surface and the second layer 1.5 μm thickness copper layer is deposited onto it, which was supposed to serve as a solder when the metallized oxide samples are joined together. It is established that these films remain sufficiently dense when they are briefly heated to 1050°C and after annealing at 1100°C they decompose immediately into individual droplets that cover more than half of the area of oxide substrates. The kinetic curves of films decomposition on all oxides are constructed depending on the annealing temperature and the exposure time at each temperature, and two technologies for joining these metallized oxides by pressure welding and soldering have been developed.

Key words: kinetics of disintegration, nickel–copper double-film, annealing, oxide material.

(Отримано 2 жовтня 2019 р.; остаточн. варіант — 12 травня 2020 р.)

1. ВСТУП

З'єднання керамічних матеріалів між собою та з металами виконують двома основними методами: лютуванням розтопленими металевими лютцями [1–3] та твердофазним зварюванням тиском [4–6].

Оскільки керамічні матеріали, зокрема, оксидні, звичайно погано змочуються розтопами металів, часто застосовують металеві покриття, які наносять різними способами (електронно-променеве розпорошення, магнетронне розпорошення, хімічне осадження та ін.). Для виготовлення цих покриттів найчастіше використовують адгезійно-активні метали такі, як Титан, Хром, Ніобій та ін. Потім металізовані таким чином керамічні деталі лютують у вакуумі або в інертному середовищі (аргон, гелій тощо) розтопленими металевими лютцями на основі Стануму, Аргентуму, Купруму, Ніколу та ін. Товщина лютованого шва у цьому випадку становить від 50–100 мкм до кількох міліметрів. Іноді використовують багат шарові металеві покриття, але товщини шарів та лютованих швів залишаються великими [7–9].

Водночас є відомості про те, що зменшення товщини лютованого шва призводить до значного збільшення міцності лютованого з'єднання [10–12]. Одержати лютовані або зварні з'єднання металізованої кераміки можливо за рахунок зменшення товщини як металізаційного покриття на кераміці, так і самого лютцевого шару. Цього можна досягти, якщо лютцевий метал, або стоп також наносити у вигляді досить тонкої плівки, товщина якої не перевищує кількох мікронів. Крім того, тонкий паяльний шов дозволяє одер-

жувати прецизійні зварні або лютовані керамічні та кераміко-металеві вузли, які можуть знайти застосування в мікроелектроніці, радіотехніці, СВЧ-техніці тощо.

Цю мету можна реалізувати наносячи на керамічні поверхні подвійні металеві плівки, одна з яких має товщину 100–200 нм і складається з адгезійно-активного металу, наприклад, Ti, Cr та ін., а другий дещо товщий шар (2–3 мкм) являє собою лютець, наприклад, Cu, Ag, тощо, що забезпечить з'єднання металізованих керамічних матеріалів під час лютування або зварюванні тиском з тонким лютованим швом 2–4 мкм завтовшки.

У літературних джерелах є відомості про застосування дво- та багатошарових металевих покриттів у виробництві літальних апаратів, в імплантних конструкціях у тілі людини, у пристроях плоских дисплеїв, світловипромінювальних пристроях і сонячних батареях, у вузлах тертя, як чутливі елементи тензодавачів, ерозійно-стійких покриттів лопаток двигунів різного призначення, покриття для ріжучого інструмента та деталей машин [13–18].

Структура таких дво- або багатошарових покриттів, визначення оптимального співвідношення товщини кожного шару, процеси взаємодії на межі фаз, в тому числі з керамічною фазою, є важливим напрямком досліджень.

Дослідження кінетики диспергування нікелево-мідних двошарових покриттів (плівок) на оксидах під час відпалу у вакуумі та створення на їх основі лютованих та зварних з'єднань оксидної кераміки з надтонким лютованим швом, товщина якого не перевищує 5 мкм, є метою даної роботи.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

У даній роботі використано електронно-променевий спосіб напорошення металевих плівок.

Товщину нанесених наноплівки вимірювали двома методами:

- 1) метал заданої маси (розрахованої для плівок потрібної товщини) повністю випаровують, тоді товщину плівки можна легко розрахувати за законом Ламберта [19, 20];
- 2) за допомогою спеціального кварцового давача, який знаходиться у вакуумній камері напорошення безпосередньо біля зразка, на який напорошують плівку.

Тверді неметалеві підкладки, виготовлені з лейкосапфіру, алюмооксидної та діоксидноцирконієвої керамік, являли собою невеликі тонкі пластинки розмірами 4×3×2 мм. Одна з плоских поверхонь кожного зразка добре відличкована до шорсткості $R_z = 0,03–0,05$ мкм. Після личкування всі зразки ретельно знежирено та відпалено у вакуумі за температури 1100°C протягом однієї години.

Подвійні металеві плівки на оксидах (лейкосапфір, алюмооксидна

та диоксидноцирконієва кераміка) складалися з двох шарів різної товщини. Перший шар являв собою наноплівку нікелю завтовшки 150 нм, яка напорошена безпосередньо на відличковані поверхні оксидів і слугувала металізаційним покриттям для нанесення на них другого товщого шару. Цей другий шар завтовшки 1,5 мкм являв собою плівку міді, яка слугувала лютцевим матеріалом для з'єднання металізованих оксидів лютуванням або зварюванням тиском. Якість всіх нанесених наноплівок контролювали за допомогою металографічного мікроскопа XJL-17. Оскільки як лютцевий матеріал у даному випадку вибрано мідь, зразки з нанесеними на них металевими плівками відпалювали у вакуумній камері за різних температур (від 900 до 1100°C) у вакуумі не більше за $2 \cdot 10^{-3}$ Па протягом різних проміжків часу (від 5 до 20 хв).

Відпалені зразки досліджували за допомогою скануючих електронних мікроскопів JSM-6700 F та Superprobe-733, отримуючи мікрофотографії. З використанням цих мікрофотографій були визначені площі островців металу на поверхні неметалевих зразків планіметричним методом, тобто визначення маси вирізаних з паперових відбитків мікрофотографій елементів металізованих поверхонь зразків [11]. Отримані експериментальні дані були оброблені у вигляді графіків, які демонстрували залежність площ поверхонь зразків, вкритих металевими плівками, від параметрів відпалу (температура, час).

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Суцільна вихідна подвійна плівка нікель–мідь на лейкосапфірі в результаті п'ятихвилинного відпалу за 900°C практично не зазнала ніяких змін, після десятихвилинної витримки вона почала трохи спучуватись, а після двадцятихвилинного відпалу вона значно спучилась, але в ній не було помітно розривів (рис. 1, а).

Плівка, яка була відпалена за 1000°C, почала потроху спучуватись вже після п'ятихвилинної витримки і залишалась майже такою навіть після двадцятихвилинного відпалу (рис. 1, б).

Інтенсивність спучування плівки у результаті п'яти-, десяти- та двадцятихвилинного відпалу за 1050°C значно зросла (рис. 1, в). У разі відпалу подвійної плівки нікель–мідь за 1100°C впродовж п'яти хвилин плівка почала спучуватись ще інтенсивніше, а після десятихвилинної витримки вона почала розриватися.

Інтенсивність розриву плівку підвищилась при двадцятихвилинній витримці за 1100°C (рис. 1, г), але плівка все одно вкривала собою близько 80% площі підкладки (рис. 2).

Таким чином, подвійна плівка Ni–Cu цілком придатна для використання надалі у з'єднанні вкритими нею зразків лейкосапфіру лютуванням та зварюванням тиском за температури до 1100°C з

тривалістю процесу лютування або зварювання тиском до двадцяти хвилин.

Вихідна суцільна подвійна плівка нікель–мідь на алюмооксидній кераміці залишилась практично без змін навіть після двадцятихвилинного відпалу за 900°C (рис. 3, *а*).

П'ятихвилинний відпал за 1000°C також не змінив морфологію плівки, яка трохи спучилась, а у разі збільшення часу відпалу до десяти хвилин плівка почала спучуватися інтенсивно і в ній з'явилися перші тріщини.

У випадку двадцятихвилинної витримки за 1000°C плівка почала тріскатися значно сильніше (рис. 3, *б*), тим не менше вкриваючи при цьому майже 90% поверхні підкладки.

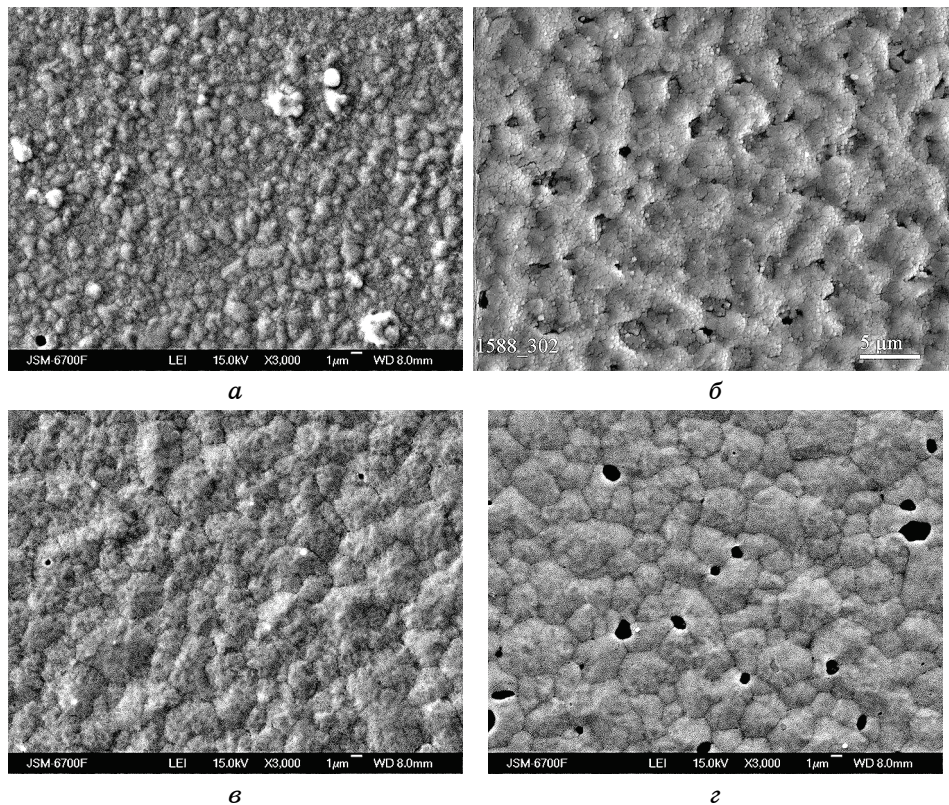


Рис. 1. СЕМ зображення подвійної плівки нікель–мідь на лейкосапфірі, відпаленої у вакуумі протягом 20 хвилин за різних температур, $\times 3000$: *а* — 900°C, *б* — 1000°C, *в* — 1050°C, *г* — 1100°C.

Fig. 1. SEM image double nickel–copper film onto leucosapphire which is annealed in vacuum during 20 min at various temperatures, $\times 3000$: *а*—900°C, *б*—1000°C, *в*—1050°C, *г*—1100°C.

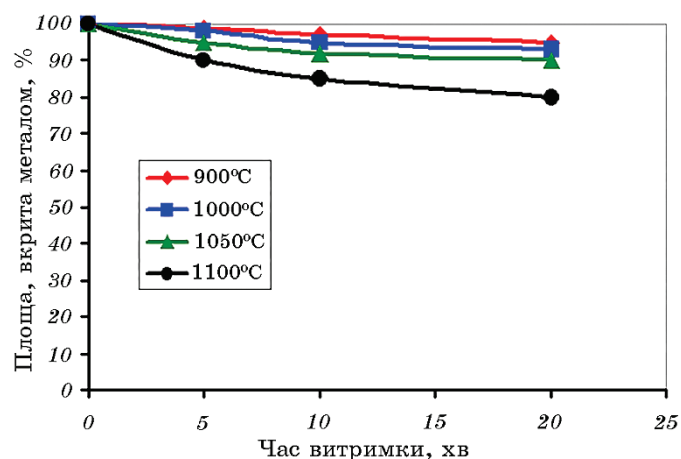


Рис. 2. Залежність площі лейкосапфіру, вкритої подвійною нікелево-мідною плівкою, від часу відпалу за різних температур (900–1100°C).

Fig. 2. Leucosapphire area covered by double nickel–copper film depending on annealing time at various temperatures (900–1100°C).

Після п'ятихвилинного відпалу за 1050°C вигляд суцільної плівки мало змінився, а зі збільшенням часу витримки до десяти хвилин плівка сильно спучилась по всій площі поверхні підкладки

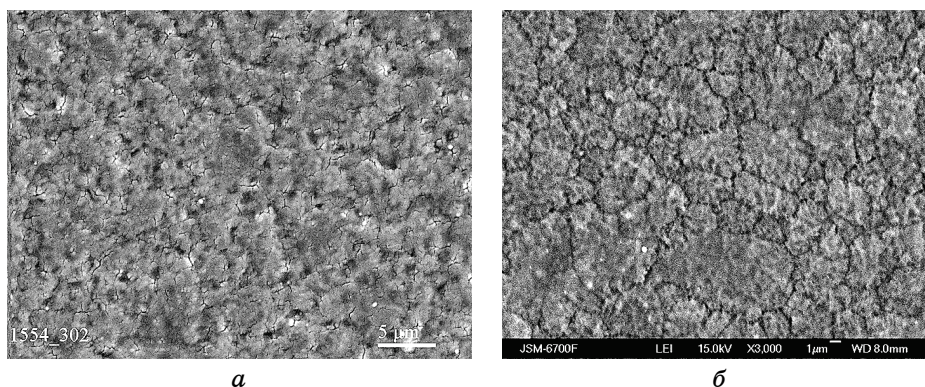
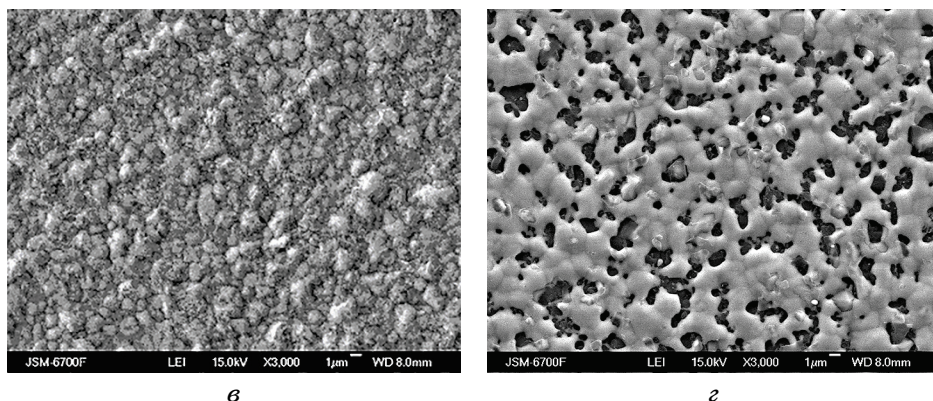


Рис. 3. СЕМ зображення подвійної плівки нікель–мідь на алюмооксидній кераміці, відпаленої у вакуумі за різних температур протягом різного часу, $\times 3000$: *a* — 900°C, 20 хв; *б* — 1000°C, 20 хв; *в* — 1050°C, 10 хв; *г* — 1100°C, 10 хв.

Fig. 3. SEM image double nickel–copper film onto alumina ceramics which was annealed in vacuum at various temperatures during various time, $\times 3000$: *a*—900°C, 20 min; *б*—1000°C, 20 min; *в*—1050°C, 10 min; *г*—1100°C, 10 min.



Продовження рис. 3.

Continuation of Fig. 3.

(рис. 3, а) і після двадцятихвилинного відпалу вона почала диспергувати, але все одно вкривала близько 80% площі поверхні підкладки (рис. 4).

Підвищення температури відпалу до 1100°C обумовило топлення мідного шару, який вкривав собою близько 90% площі нікелевого

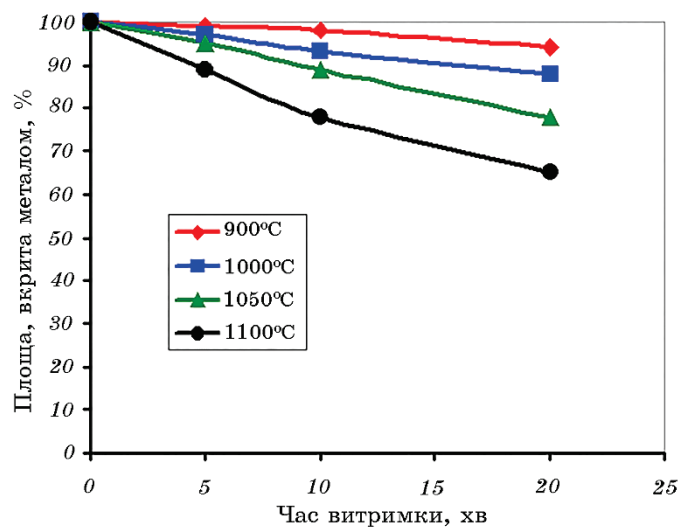


Рис. 4. Залежність площі алюмооксидної кераміки, вкритої подвійною нікелево-мідною плівкою, від часу відпалу за різних температур (900–1100°C).

Fig. 4. Alumina ceramics area covered by double nickel-copper film depending on annealing time at various temperatures (900–1100°C).

покриття після п'ятихвилинної витримки, 80% — після десятихвилинного відпалу (рис. 3, *г*; рис. 4) і лише близько 65% цієї площі після двадцятихвилинної витримки (рис. 4).

Отже, така плівка придатна для лютування або зварювання тиском за 1100°C лише за умови тривалості цих процесів не більше десяти хвилин.

У результаті відпалу суцільної вихідної подвійної плівки нікель-мідь на диоксидноцирконієвій кераміці за 900°C певні зміни її морфології почалися вже після п'ятихвилинної витримки, які посилилися у випадку десятихвилинного відпалу, а після двадцятихвилинного відпалу в ній з'явилися пори та тріщини, які становили близько 8% всієї площі поверхні (рис. 5, *а*). Інтенсивність спучу-

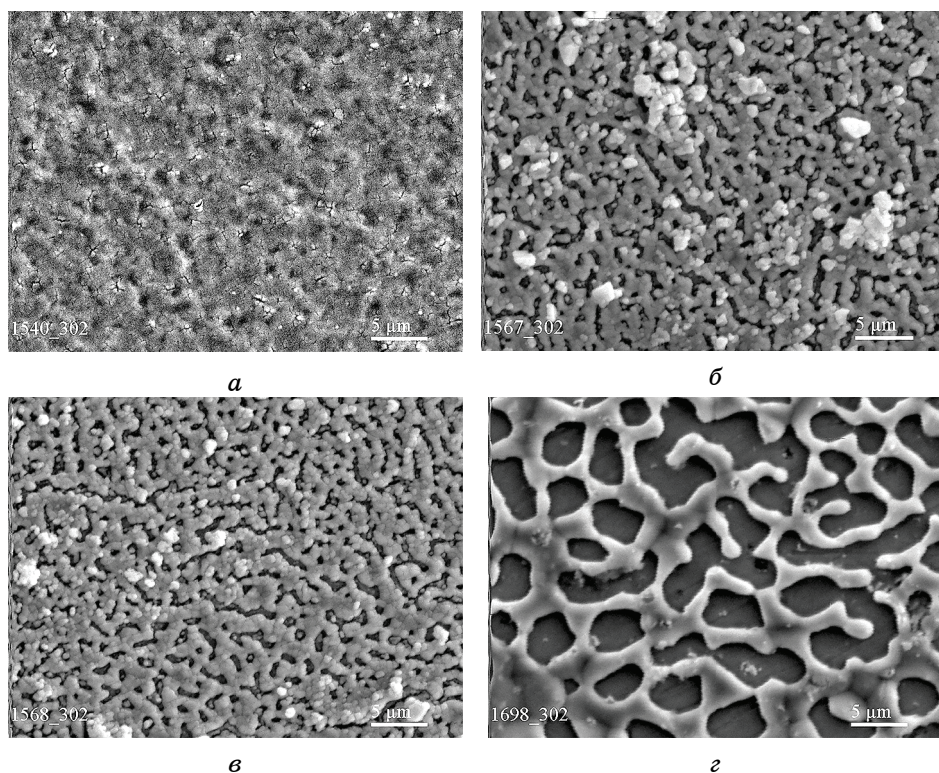


Рис. 5. СЕМ зображення подвійної плівки нікель-мідь на диоксидноцирконієвій кераміці, відпаленої у вакуумі за різних температур протягом різного часу, $\times 3000$: *а* — 900°C, 20 хв; *б* — 1000°C, 20 хв; *в* — 1050°C, 10 хв; *г* — 1100°C, 20 хв.

Fig. 5. SEM image double nickel-copper film onto zirconia ceramics which is annealed in vacuum at various temperatures during various time, $\times 3000$: *a* — 900°C, 20 min; *б* — 1000°C, 20 min; *в* — 1050°C, 10 min; *г* — 1100°C, 20 min.

вання плівки зростає з підйомом температури до 1000°C за витримки п'ять та десять хвилин і після двадцяти хвилин відпалу вона значно диспергувала, вкриваючи собою близько 80% площі поверхні підкладки (рис. 5, б; рис. 6). Підвищення температури відпалу до 1050°C призвело до початку диспергування плівки вже після п'ятихвилинної витримки, а у разі збільшення тривалості відпалу диспергування плівки посилювалось так, що після десятихвилинної витримки плівка вкривала близько 80% площі поверхні підкладки (рис. 5, в; рис. 6), а після двадцятихвилинного відпалу — лише 70% (рис. 6). П'ятихвилинний відпал за 1100°C призвів до повного розтоплення та розпаду мідного шару на фрагменти чудернацької форми, які вкривали близько 70% площі поверхні (рис. 6). У випадку десятихвилинної витримки за 1100°C плівка почала ще інтенсивніше топитися, вкриваючи при цьому близько 65% площі підкладки (рис. 6) і після двадцятихвилинної витримки плівка розпалась на мереживо, яке займало 50% площі підкладки (рис. 5, г; рис. 6).

Таким чином, подвійна плівка Ni-Cu цілком придатна для використання у подальшому з'єднанні вкритими нею зразків діоксидноцирконієвої кераміки зварюванням тиском за температури до 1050°C з тривалістю процесу зварювання тиском до десяти хвилин, коли плівка вкриває щонайменше 80% площі поверхні підкладки.

Використовуючи одержані в результаті досліджень дані, було ви-

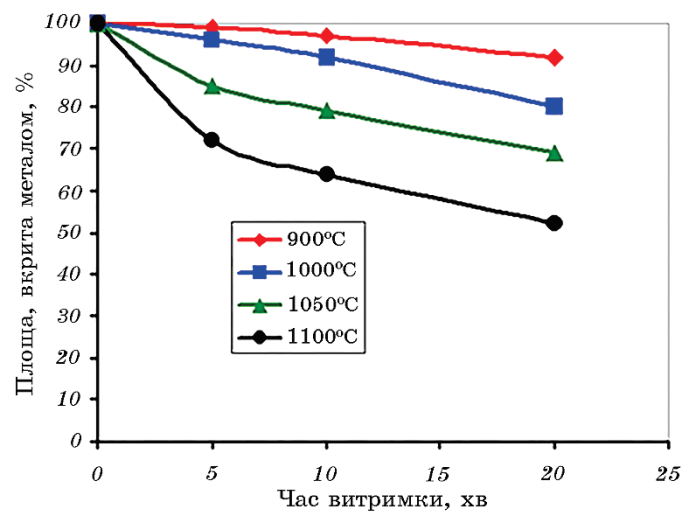


Рис. 6. Залежність площі діоксидноцирконієвої кераміки, вкритої подвійною нікелево-мідною плівкою, від часу відпалу за різних температур (900 – 1100°C).

Fig. 6. Zirconia ceramics area covered by double nickel–copper film depending on annealing time at various temperatures (900 – 1100°C).

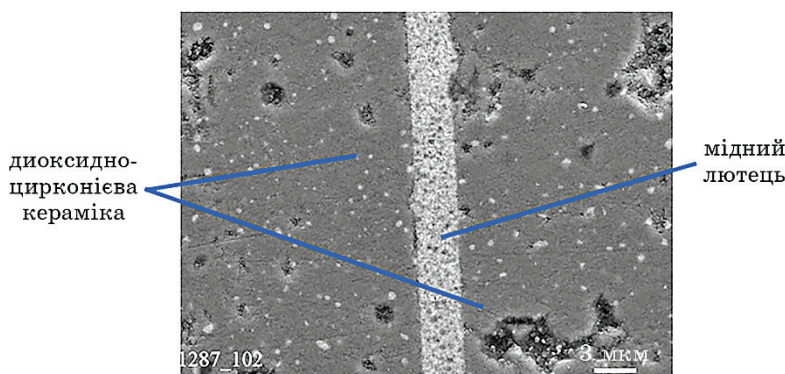


Рис. 7. З'єднання диоксидноцирконієвої кераміки, виготовлене зварюванням тиском через подвійну нікелево-мідну плівку, з надтонким зварним швом, $\times 2000$.

Fig. 7. Zirconia ceramics joint made by pressure welding using double nickel–copper film having ultrathin welding seam, $\times 2000$.

значено оптимальні параметри технологічних режимів з'єднання (температура, тривалість процесу) оксидних матеріалів, металізованих подвійними нікелево-мідними плівками, на основі яких розроблена технологія зварювання тиском та лютування цих матеріалів. Зварювання тиском виконували за температури 1000°C з десятихвилинною витримкою зразків під тиском, отримуючи при цьому зварний шов завтовшки біля $2,5\text{ мкм}$ з максимальною міцністю при зсуві 130 МПа (рис. 7). З'єднання зразків лютуванням виконували за температури 1100°C з невеликим навантаженням ($0,001\text{ МПа}$) та витримкою не більше за сім хвилин. Товщина одержаного лютованого шва при цьому була не більшою за 3 мкм , а міцність при зсуві складала близько 110 МПа . Отже, найприйнятнішим засобом з'єднання оксидних матеріалів, металізованих подвійними нікелево-мідними плівками, є зварювання тиском.

4. ВИСНОВКИ

Дослідження поведінки у випадку відпалу подвійних плівок нікель–мідь, нанесених на алюмооксидну кераміку, лейкосапфір та диоксидноцирконієву кераміку, дало змогу визначити, що ці плівки на всіх оксидах зберігають свою щільність навіть після двадцятихвилинного відпалу за 1000°C . Відпал за 1050°C найбільше позначився на плівці, яка була нанесена на диоксидноцирконієву кераміку, оскільки після двадцятихвилинної витримки за цієї температури вона вкривала лише 75% площі зразка, водночас, як на інших двох оксидах плівка вкривала від 85 до 95% площі підкладки.

Ця тенденція збереглась у подальшому відпалі плівки до 1100°C (тобто, у випадку розтоплення міді), коли площа диоксидноцирконієвої кераміки, вкритої подвійною нікелево-мідною плівкою зменшилась до 60% площі поверхні зразка.

Побудовано кінетичні криві диспергування подвійної нікелево-мідної плівки, нанесеної на оксидноалюмінієву кераміку, лейкосапфір та диоксидноцирконієву кераміку, та відпаленої у вакуумі за температур 900–1100°C впродовж різних тривалостей відпалу (від 5 до 20 хв). Ці криві дають змогу визначити оптимальні параметри з'єднання (температуру, час проведення процесу) оксидних матеріалів зварюванням тиском або лютуванням.

Використовуючи одержані дані, розроблено технології з'єднання тиском та лютуванням досліджених матеріалів з утворенням надтонких лютованих швів (до 3 мкм), виготовлено та випробовувано дослідні зразки, міцність яких на зсув сягала 130 МПа.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. М. А. Рубашев, Г. И. Бердов, В. Н. Гаврилов, *Термостойкие диэлектрики и их спаи с металлами в новой технике* (Москва :Атомиздат: 1980).
2. Ю. В. Найдич, *Контактные явления в металлических расплавах* (Киев: Наукова думка: 1972).
3. Н. Ф. Лашко, С. В. Лашко, *Пайка металлов* (Москва: Машиностроение: 1967).
4. Н. Ф. Казаков, *Диффузионная сварка материалов* (Москва: Машиностроение: 1976).
5. В. А. Бачин, *Теория, технология и оборудование диффузионной сварки* (Москва: Машиностроение: 1991).
6. И. И. Метелкин, М. А. Павлов, Н. В. Поздеева, *Сварка керамики с металлами* (Москва: Металлургия: 1977).
7. В. Р. Евдокимов, С. Л. Каштанов, Л. Н. Ладо, С. Н. Шубин, *Сварочное производство*, 8: 2 (1995).
8. M. Sirakane, M. Nakakhasi, and T. Yamadzaki, *Method of Joining Aluminum Oxide and Metal*, Application 60-239373 for an Invention from 15.05.1984, Japan (Publ. 28.11.85).
9. M. Namura, Y. Ito, and K. Kaneya, *Method of Joining metal and Ceramics*, Application 380163 for an Invention from 21.08.1989, Japan (Publ. 04.04.91).
10. Y. Naidich, *Industrial Ceramics*, 19, No. 3: 162 (1999).
11. Ю. В. Найдич, И. И. Габ, Б. Д. Костюк, Т. В. Стецюк, Д. И. Куркова, С. В. Дукаров, *Доповіді академії наук*, 35: 97 (2007).
12. Ю. В. Найдич, И. И. Габ, Б. Д. Костюк, Т. В. Стецюк, Д. И. Куркова, С. В. Дукаров, *Техника машиностроения*, 1: 28 (2006).
13. В. М. Якович В. М. Комаровская, *Материалы XII Республиканской научно-практической конференции молодых ученых и студентов БНТУ «Инженерно-педагогическое образование в XXI веке» (19–20 мая, 2016)* (Минск: 2016), ч. 2, с. 215.
14. А. А. Андреев, Г. И. Костюк, Н. А. Минаев, *Авиационно-космическая тех-*

- ника и технология, **89**, № 2: 28 (2012).
15. С. В. Зайцев, Ю. В. Герасименко, М. В. Лобанов, А. М. Ховив, *Конденсированные среды и межфазные границы*, **16**, № 2: 153 (2014).
 16. Т. А. Лобанова, А. О. Волхонский, И. В. Блинков, *Инноватика и экспертиза*, **10**, № 1: 76 (2013).
 17. Д. В. Великодный, С. И. Проценко, И. Е. Проценко, *Физическая инженерия поверхности*, **6**, № 1–2: 37 (2008).
 18. M. Naveed, A. Obrosof, and S. Weiß, *Conf. Papers in Sci.*, **2015**: 873543 (2015).
 19. С. Метфессель, Тонкие пленки, их изготовление и измерение, (Госэнергоиздат, Москва-Ленинград, 1963).
 20. Г. Хаас, Р. Э. Тун, *Физика тонких пленок* (Москва: Мир: 1968).

REFERENCES

1. M. A. Rubashev, G. I. Berdov, V. N. Gavrilov, *Termostoykie Dielektriki i Ikh Spai s Metallami v Novoy Tekhnike* (Moscow: Atomizdat: 1980) (in Russian).
2. Yu. V. Naidich, *Kontaktnye Yavleniya v Metallicheskih Rasplavakh* (Kyiv: Naukova Dymka: 1972) (in Russian).
3. N. F. Lashko and S. V. Lashko, *Payka Metallov* (Moscow: Mashinostroenie: 1967) (in Russian).
4. N. F. Kazakov, *Diffuzionnaya Svarka Materialov* (Moscow: Mashinostroenie: 1976) (in Russian).
5. V. A. Bachin, *Teoriya, Tekhnologiya i Oborudovanie Diffuzionnoy Svarki* (Moscow: Mashinostroenie: 1991) (in Russian).
6. I. I. Metelkin, M. A. Pavlov, and N. V. Pozdeeva, *Svarka Keramiki s Metallami* (Moscow: Metallurgiya: 1977) (in Russian).
7. V. R. Yevdokimov, S. L. Kashtanov, L. N. Lado, and S. N. Shubin, *Svarochnoe Proizvodstvo*, **8**: 2 (1995) (in Russian).
8. M. Sirakane, M. Nakakhasi, and T. Yamadzaki, *Method of Joining Aluminum Oxide and Metal*, Application 60-239373 for an Invention from 15.05.1984, Japan (Publ. 28.11.85).
9. M. Namura, Y. Ito, and K. Kaneya, *Method of Joining metal and Ceramics*, Application 380163 for an Invention from 21.08.1989, Japan (Publ. 04.04.91).
10. Y. Naidich, *Industrial Ceramics*, **19**, No. 3: 162 (1999).
11. Yu. V. Naidich, I. I. Gab, B. D. Kostyuk, T. V. Stetsyuk, D. I. Kurkova, and S. V. Dukarov, *Dopovidi Akademiyi Nauk*, **35**: 97 (2007) (in Russian).
12. Yu. V. Naidich, I. I. Gab, B. D. Kostyuk, T. V. Stetsyuk, D. I. Kurkova, and S. V. Dukarov, *Tekhnika Mashinostroeniya*, **1**: 29 (2006) (in Russian).
13. V. M. Yakovich and V. M. Komarovskaya, *Materialy XII Respublikanskoy Nauchno-Prakticheskoy Konferentsii Molodykh Uchenykh i Studentov BNTU 'Inzhenerno-Pedagogicheskoe Obrazovanie v XXI Veke' (May 19–20, 2016)* (Minsk: 2016), ch. 2, p. 215 (in Russian).
14. A. A. Andreyev, G. I. Kostyuk, and N. A. Minaev, *Aviatsionno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, **89**, No. 2: 28 (2012) (in Russian).
15. S. V. Zaytsev, Yu. V. Gerasimenko, M. V. Lobanov, and A. M. Khoviv, *Kondensirovannye Sredy i Mezhfaznye Granitsy*, **16**, No. 2: 153 (2014) (in Russian).
16. T. A. Lobanova, A. O. Volkhonskiy, and I. V. Blinkov, *Innovatika i Ekspertiza*,

- 10, No. 1: 76 (2013) (in Russian).
17. D. V. Velikodnyy, C. I. Protsenko, and I. Ye. Protsenko, *Fizicheskaya Inzheneriya Poverkhnosti*, **6**, Nos. 1–2: 37 (2008) (in Russian).
 18. M. Naveed, A. Obrosof, and S. Weiß, *Conf. Papers in Sci.*, **2015**, Article ID [873543](#) (2015).
 19. S. Metfessel, *Tonkie Plenki, Ikh Izgotovlenie i Izmerenie* (Moscow–Leningrad: Gosenergoizdat: 1963) (in Russian).
 20. G. Khaas and R. E. Tun, *Fizika Tonkikh Plenok* (Moscow: Mir: 1968) (in Russian).