

PACS numbers: 68.35.-p, 68.55.-a, 81.05.Je, 81.15.Cd, 81.20.Vj, 81.40.Ef, 82.70.Uv

Кінетика диспергування при відпалі у вакуумі цирконійових наноплівоч, нанесених на неметалеві матеріали

Ю. В. Найдіч, І. І. Габ, Т. В. Стецюк, Б. Д. Костюк

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

Наведено результати дослідження кінетики диспергування цирконійових наноплівоч завтовшки у 100 нм, яких було нанесено на поверхні зразків, виготовлених з монокристалів Al_2O_3 (лейкосапфір), ZrO_2 , SiC та кераміки AlN, і відпалено у вакуумі за температур 1400–1600°C впродовж різного часу витримки при кожній температурі в інтервалі 2–20 хв.

Ключові слова: кінетика диспергування, цирконійова наноплівка, монокристал, лейкосапфір, кераміка.

Dispersion kinetics of the zirconium nanofilms with thickness of 100 nm deposited onto samples' surfaces, which are fabricated from single crystals of Al_2O_3 (leucosapphire), ZrO_2 , SiC, and ceramics based on AlN and annealed in vacuum at 1400–1600°C is investigated during different time of soaking at each temperature in interval 2–20 min.

Key words: dispersion kinetics, zirconium nanofilms, single crystal, leucosapphire, ceramics.

Приведены результаты исследования кинетики диспергирования циркониевых наноплёнок толщиной в 100 нм, нанесённых на поверхности образцов, изготовленных из монокристаллов Al_2O_3 (лейкосапфир), ZrO_2 , SiC и кераміки AlN, и отожжённых в вакууме при температурах 1400–

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

*I. M. Frantsevich Institute for Problems in Materials Science, N.A.S. of Ukraine,
3 Academician Krzhyzhanovsky Str., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Please cite this article as: Yu. V. Naidich, I. I. Gab, T. V. Stetsyuk, and B. D. Kostyuk, Kinetics of a Dispersion of the Zirconium Nanofilms Deposited on Nonmetallic Materials During Annealing in Vacuum, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 7: 881–892 (2017) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.39.07.0881.

1600°C в течение различного времени выдержки при каждой температуре в интервале 2–20 мин.

Ключевые слова: кинетика диспергирования, циркониевая наноплёнка, монокристалл, лейкосапфир, керамика.

(Отримано 19 червня 2017 р.)

1. ВСТУП

З'єднання кераміки та інших неметалевих матеріалів з металами з застосуванням металевих припоїв та прокладок, що деформуються, широко застосовується в сучасній техніці. Для одержання таких з'єднань часто використовують тонкі металеві плівки, які знаходять широке застосування в різних галузях науки й техніки.

Товщина плівок, нанесених на металеві та неметалеві матеріали, може знаходитись в широкому діапазоні — від кількох нанометрів до десятків мікронів. В техніці дуже часто використовують металеві плівки різних товщин, які можуть бути нанесені різними способами (плазмовим напорошенням, магнетронним розпорошенням, хемічним та електрохемічним методами, електронно-променевим розпорошенням тощо) на неметалеві деталі з метою з'єднання їх між собою або з металами паянням або зварюванням тиском [1–6].

Особливу роль при з'єднанні таких різнорідних матеріалів відіграють адгезійно активні метали, до яких відносяться титан, цирконій, ніобій, гафній та інші. Ці метали або додають в склад металевих припоїв, або використовують в якості покриттів, зокрема у вигляді тонких плівок на з'єднуваних поверхнях матеріалів, а при застосуванні зварювання тиском можливо одержати з'єднання різних матеріалів через прокладки з цих металів, які деформуються. Наведені метали мають добру адгезію як до неметалевих, так і до металевих матеріалів і забезпечують добре розтікання металевих припоїв і взаємодію на межі припій–тверді поверхні, що мають бути з'єднані.

Позаяк в процесі паяння чи зварювання тиском металізовані неметалеві деталі мають нагрітись до достатньо високих температур (1300–1600°C), вивчення процесів диспергування–коагулювання, що відбуваються при відпалі в цих металевих наноплівках, становить як пізнавальний інтерес, так і практичне значення для розробки технологічних режимів з'єднання неметалевих матеріалів.

Раніше нами була досліджена кінетика диспергування при відпалі у вакуумі наноплівок ніобію та гафнію, нанесених на оксидні та неоксидні неметалеві матеріали, зокрема сапфір, кераміку на основі ZrO_2 та ін. [7, 8].

Завданням даної роботи було вивчення кінетики диспергування при відпалі цирконійових наноплівок, нанесених на деякі оксидні

та неоксидні матеріали.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Цирконійову наноплівку завтовшки у 100 нм наносили на неметалеві підкладинки розміром $4 \times 4 \times 1$ мм³, які були виготовлені з лейкосапфіру (монокристал оксиду алюмінію), монокристалів діоксиду цирконію та карбїду кремнію, а також нітридоалюмінієвої кераміки, електронно-променевим розпорошенням [9]. Підкладинки були виготовлені з матеріалів, які або самі широко використовуються в техніці, зокрема, лейкосапфір, або вони є основою високо-температурних керамік. Плівки наносили на поліровані поверхні підкладинок. Параметр шорсткості поверхні R_z дорівнював 0,03–0,05 мкм.

Відполіровані поверхні підкладинок знежирювали ацетоном та етиловим спиртом, після чого підкладинки з лейкосапфіру та діоксиду цирконію відпалювали на повітрі за температури 1200°C протягом двох годин, а потім ці ж підкладинки разом з підкладинками, виготовленими з монокристалу карбїду кремнію та нітридокремнієвої кераміки, ще відпалювали у вакуумі не нижче $2 \cdot 10^{-3}$ Па за тієї ж температури протягом однієї години. Товщину 100 нм металевих наноплівок вибрали, зважаючи на те, що такі плівки є суцільними, повністю вкривають оксидні поверхні, мають добру адгезію до них та забезпечують добре розтікання припою [10]. Більш товсті плівки мають властивість злущуватися завдяки наявності в них залишкових напружень як внаслідок ростових напружень при багат шаровому напорошенні, так і через велику різницю в температурних коефіцієнтах лінійного розширення (ТКЛР) металів плівок та матеріалів підкладинок. Плівки наносили протягом 10–15 хв. на підкладинки, температура яких була в межах 100°C, а товщину плівок визначали за допомогою спеціального пристрою, чутливим елементом якого є кварцовий датчик.

Плівки на всі підкладинки були нанесені в однакових умовах, а їх якість контролювали за допомогою металографічного мікроскопу ХЖЛ-17. Відпал вкритих металевими плівками неметалевих зразків виконували у вакуумній камері протягом різних проміжків часу (від 2 до 20 хв.) за різних температур (1200–1600°C) у вакуумі не гірше $2 \cdot 10^{-3}$ Па.

Відпалені зразки досліджували за допомогою сканувальних електронних мікроскопів JSM-6700, JSM-5000 та атомно-силового мікроскопу Nano Scope III a, одержуючи при цьому мікрофотографії.

Шляхом використання цих мікрофотографій була вирахована частина поверхні підкладинок, вкрита острівцями плівок металів, планіметричним методом зважування. Тобто визначали вагу вирізаних з мікрофотографій елементів металізованих покриттів зраз-

ків [2]. Дані, одержані за цим методом, були оброблені та представлені у вигляді залежностей площ поверхонь зразків, що залишилися вкритими фрагментами металевих плівок після відпалу, від параметрів відпалу (температури та часу відпалу).

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Вихідні плівки цирконію на всіх підкладках були суцільними, без будь яких суттєвих дефектів і на мікрофотографіях, одержаних з використанням електронних сканувальних мікроскопів, видно лише темне поле однорідного темно-сірого кольору.

При відпалі цирконійової плівки на лейкосапфірі перші зміни в структурі плівки у вигляді дрібних тріщин з'явилися лише після її п'ятихвилинного відпалу при 1400°C. Кількість тріщин побільшала після десятихвилинної витримки за цієї ж температури, а після двадцятихвилинного відпалу цирконійова плівка вже помітно диспергувала (рис. 1, *а*). Після двохвилинного відпалу при 1500°C плівка почала диспергувати та одночасно в ній з'явилися продовгуваті, але не широкі тріщини. Подальше збільшення часу відпалу за цієї температури до п'яти та десяти хвилин інтенсифікувало процес розтріскування та диспергування наноплівки, котрий значно посилювався після двадцятихвилинної витримки (рис. 1, *б*). В результаті відпалу при 1600°C плівка почала достатньо інтенсивно диспергувати з перших хвилин відпалу, тобто від двох до п'яти хвилин витримки. Після десятихвилинного відпалу при 1600°C плівка диспергувала майже повністю (рис. 1, *в*), і завершився процес її розпаду після двадцятихвилинної витримки, коли залишки плівки вкривали лише близько 20% поверхні лейкосапфіру (рис. 2).

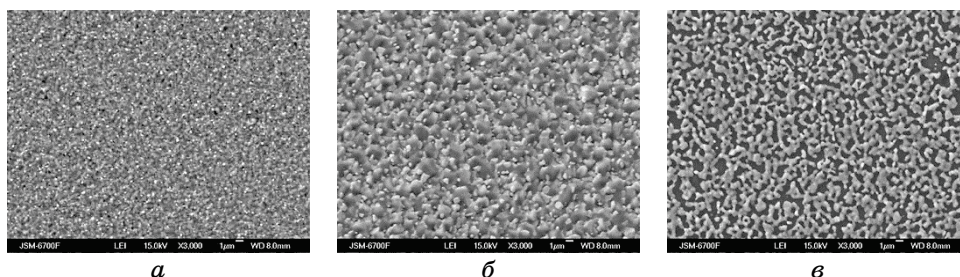


Рис. 1. СЕМ-зображення ($\times 3000$) плівки цирконію завтовшки у 100 нм на лейкосапфірі, відпаленої у вакуумі: *а* — 1400°C, 20 хв., *б* — 1500°C, 20 хв., *в* — 1600°C, 10 хв.

Fig. 1. SEM images ($\times 3000$) of zirconium film with thickness of 100 nm on leucosapphire after annealing in vacuum: *a*—1400°C, 20 min, *b*—1500°C, 20 min, *c*—1600°C, 10 min.

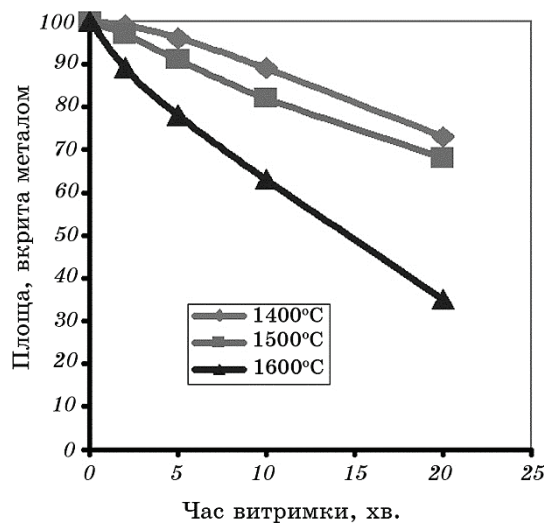


Рис. 2. Залежність площі лейкосапфіру, вкритої цирконійовою плівкою, від часу відпалу за різних температур (1400–1600°C).

Fig. 2. Dependence of leucosapphire area covered by zirconium film on annealing time at various temperatures (1400–1600°C).

На рисунку 2 наведено графіки, що відображають кінетику диспергування цирконійової наноплівки на лейкосапфірі при відпалі її за різних температур (1400–1600°C) протягом витримки при кожній температурі від 2 до 20 хв.

Вихідна плівка цирконію на діоксиді цирконію (монокристал), також як і на лейкосапфірі, була суцільною і залишалась такою аж до п'ятихвилинного відпалу при 1400°C. При цьому в ній виникли лише поодинокі тріщини, мабуть через різницю в термічних коефіцієнтах лінійного розширення цирконію ($5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$) та монокристалу діоксиду цирконію ($11 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$). Після десятихвилинного відпалу при 1400°C в структурі наноплівки з'явилися певні зміни і вона почала частково спучуватися та розтріскуватися, а після двадцятихвилинної витримки вся плівка почала диспергувати (рис. 3, а).

Вже в перші хвилини відпалу плівки при 1500°C був виявлений початок її диспергування. Цей процес інтенсифікувався при подальшому збільшенні часу витримки до 10 хв., а після двадцятихвилинного відпалу плівка в значній мірі диспергувала, але при цьому вона вкривала близько 83% поверхні монокристалу діоксиду цирконію (рис. 3, б).

Зміни в структурі плівки були виявлені також після двоххвилинного її відпалу при 1600°C, а після п'ятихвилинної витримки плівка значною мірою спучилася та почала розтріскуватися. Після десятихвилинного відпалу плівка почала інтенсивно диспергувати

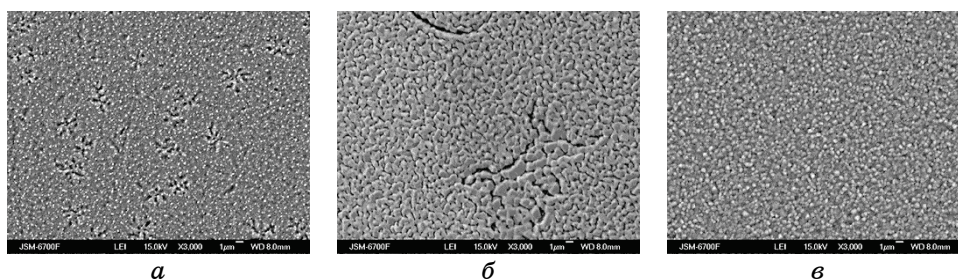


Рис. 3. СЕМ зображення ($\times 3000$) плівки цирконію завтовшки 100 нм на діоксиді цирконію, відпаленої у вакуумі: *a* — 1400°C, 20 хв., *б* — 1500°C, 20 хв., *в* — 1600°C, 10 хв.

Fig. 3. SEM images ($\times 3000$) of zirconium film with thickness of 100 nm on zirconia after annealing in vacuum: *a*—1400°C, 20 min, *б*—1500°C, 20 min, *в*—1600°C, 10 min.

(рис. 3, *в*). Двадцятихвилинна витримка призвела до сильного розпаду плівки, при цьому елементи її виявилися певною мірою пов'язані між собою, а не зовсім відокремленими і вкривали близько 68% поверхні монокристалу діоксиду цирконію (рис. 4).

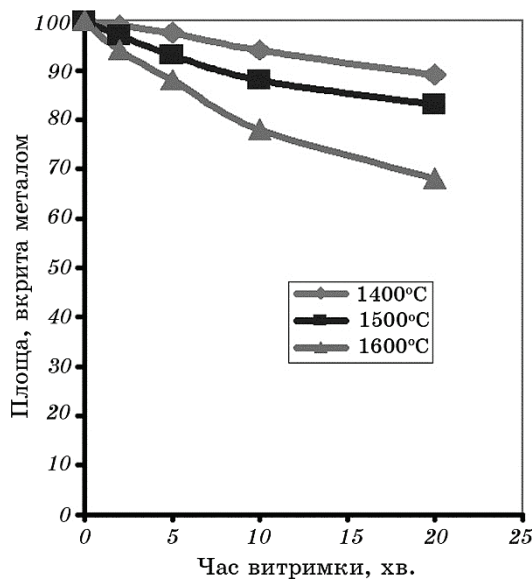


Рис. 4. Залежність площі діоксиду цирконію, вкритої цирконійовою плівкою, від часу відпалу при різних температурах (1400–1600°C).

Fig. 4. Dependence of the Zirconia area covered by zirconium film on annealing time at various temperatures (1400–1600°C).

На рисунку 4 побудовано графіки, що відображають кінетику диспергування цирконійової наноплівки на монокристалі діоксиду цирконію при відпалі її за різних температур (1400–1600°C) протягом витримки при кожній температурі від 2 до 20 хвилин.

Вихідна плівка цирконію на нітриді алюмінію, також як і на оксидах, була суцільною і в ній також не відбувалось помітних змін навіть після двадцятихвилинного нагріву до 1300°C. Перші зміни в структурі плівки з'явилися після двоххвилинного відпалу при 1400°C, після п'ятихвилинного відпалу за цієї температури в плівці з'явилися невеликі тріщини і вона почала спучуватись в деяких місцях. Кількість таких спучувань значно зросла після десятихвилинного нагріву (рис. 5, *а*), а після двадцятихвилинного відпалу плівка вже сильно диспергувала (рис. 5, *б*), вкриваючи однак при цьому більше ніж 90% поверхні нітриду алюмінію.

При відпалі плівки цирконію на нітриді алюмінію при 1500°C зміни в структурі плівки вже були добре помітні після двох хвилин відпалу. Плівка місцями спучилась та розтріскалась. Після п'ятихвилинного відпалу за цієї температури плівка значною мірою диспергувала і цей процес значно посилювався після десятихвилинної витримки (рис. 5, *в*). Після двадцятихвилинного відпалу

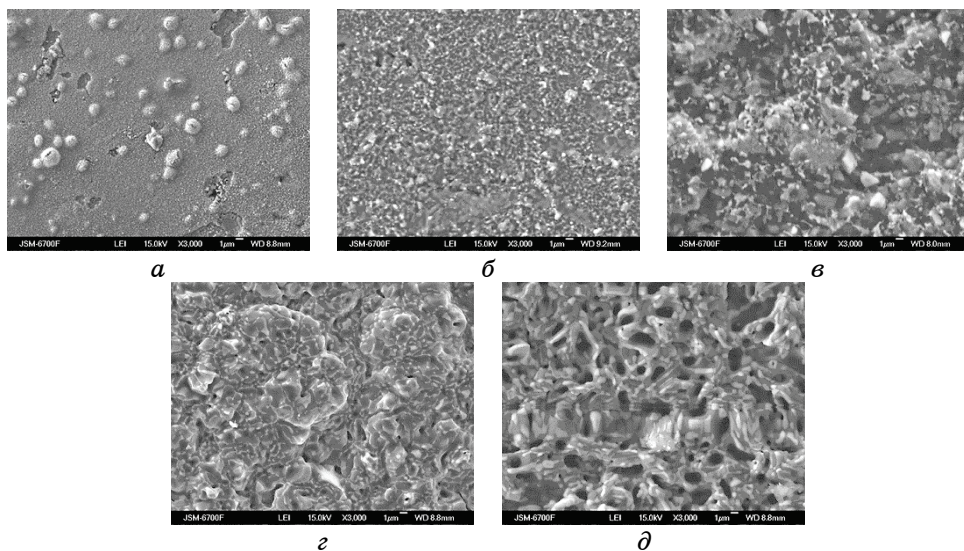


Рис. 5. СЕМ зображення ($\times 3000$) плівки цирконію завтовшки 100 нм на нітриді алюмінію, відпаленої у вакуумі: *а* — 1400°C, 10 хв., *б* — 1400°C, 20 хв., *в* — 1500°C, 10 хв., *г* — 1600°C, 2 хв., *д* — 1600°C, 20 хв.

Fig. 5. SEM images ($\times 3000$) of zirconium film with thickness of 100 nm on aluminium nitride after annealing in vacuum: *a*—1400°C, 10 min, *б*—1400°C, 20 min, *в*—1500°C, 10 min, *г*—1600°C, 2 min, *д*—1600°C, 20 min.

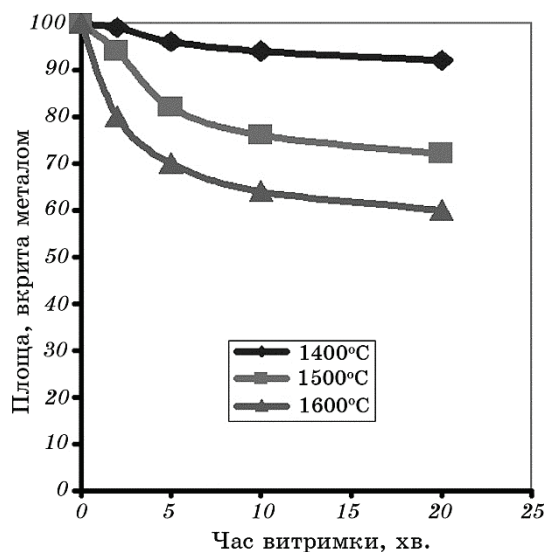


Рис. 6. Залежність площі нітриду алюмінію, вкритої цирконійовою плівкою, від часу відпалу за різних температур (1400–1600°C).

Fig. 6. Dependence of aluminium nitride area covered by zirconium film on annealing time at various temperatures (1400–1600°C).

процес диспергування плівки ще посилюється.

Температура 1600°C, ймовірно, є критичною для відпалу цирконійової наноплівки, нанесеної на нітрид алюмінію, оскільки вже після двоххвилинного нагріву окрім розпаду плівки спостерігається значна взаємодія матеріялу плівки, тобто цирконію, з нітридом алюмінію (рис. 5, *з*), а при подальшому відпалі протягом п'яти хвилин взаємодія не суттєво збільшилась. Після десятихвилинної витримки взаємодія матеріялу плівки з нітридом алюмінію трохи збільшилась і залишилась практично на тому ж рівні після двадцятихвилинного відпалу (рис. 5, *д*), тобто можна вважати, що процес диспергування плівки та зростання її взаємодії з нітридом алюмінію завершений.

На рисунку 6 наведено графіки, що відображають кінетику диспергування цирконійової наноплівки на нітриді алюмінію при відпалі її за різних температур (1400–1600°C) протягом витримки при кожній температурі від 2 до 20 хвилин.

Вихідна плівка цирконію на поверхні монокристалу карбиду кремнію була суцільною і не зазнала помітних змін при її відпалі до 1400°C протягом двох хвилин, а вже після п'ятихвилинного відпалу при 1400°C плівка розтріскалася (рис. 7, *а*), а при подальшому збільшенні витримки до десяти хвилин плівка інтенсивно диспергувала (рис. 7, *б*). Після двадцятихвилинної витримки вона розпа-

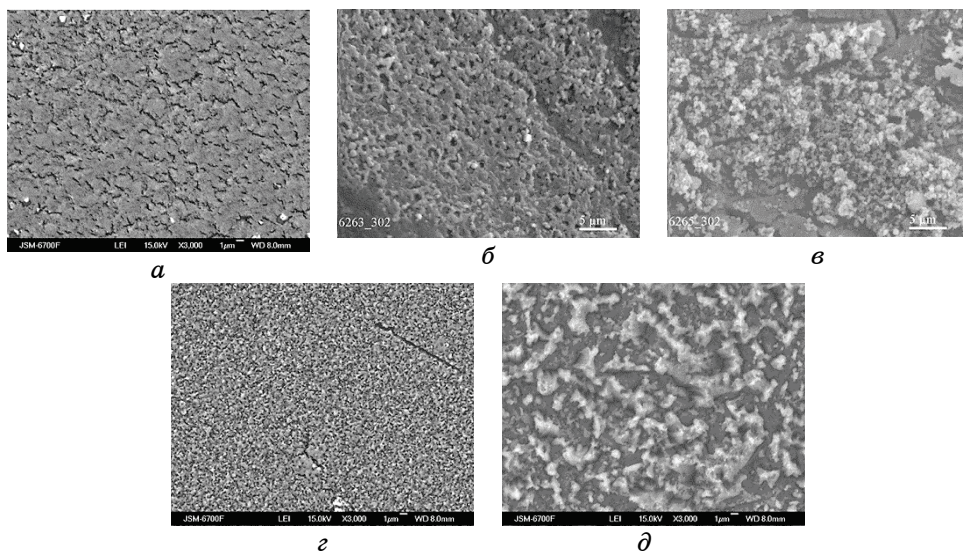


Рис. 7. SEM зображення ($\times 3000$) плівки цирконію завтовшки 100 нм на карбіді кремнію, відпаленої у вакуумі: *a* — 1400°C, 5 хв., *б* — 1400°C, 10 хв., *в* — 1500°C, 20 хв., *з* — 1600°C, 2 хв., *д* — 1600°C, 10 хв.

Fig. 7. SEM images ($\times 3000$) of zirconium film with thickness of 100 nm on silicon carbide after annealing in vacuum: *a*—1400°C, 5 min, *б*—1400°C, 10 min, *в*—1500°C, 20 min, *з*—1600°C, 2 min, *д*—1600°C, 10 min.

лася на великі шматки.

Внаслідок відпалу при 1500°C вже у перші дві хвилини у плівці відбуваються зміни, але вона ще залишається суцільною. Після п'ятихвилинної витримки за цієї ж температури плівка починає диспергувати та оголювати частину підкладки з карбиду кремнію, і після десятихвилинного відпалу вона вже значно диспергувала та втратила свою цілісність. Внаслідок двадцятихвилинної витримки плівка вже майже повністю розпалася, вкриваючи при цьому 60% поверхні монокристалу карбиду кремнію (рис. 7, *в*), і при цьому вже відбувається взаємодія плівки цирконію з підкладкою з карбиду кремнію.

Температуру відпалу 1600°C для цирконійової плівки на карбіді кремнію, також як і для цієї плівки на нітриді алюмінію, можна вважати критичною, оскільки плівка значно диспергує вже після двоххвилинної витримки (рис. 7, *з*), після п'ятихвилинної витримки помітні перші ознаки взаємодії цирконію з карбідом кремнію, при десятихвилинному відпалі при 1600°C взаємодія плівки цирконію з підкладкою з карбиду кремнію значно посилюється (рис. 7, *д*), а в результаті двадцятихвилинного відпалу рештки плівки вже повністю провзаємодіяли з поверхнею монокристалу карбиду кремнію і

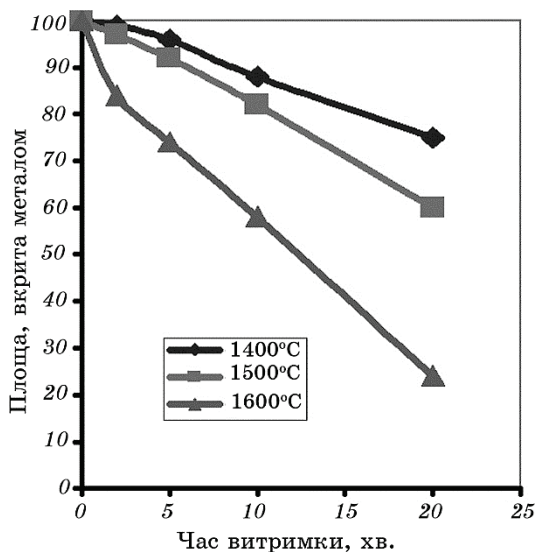


Рис. 8. Залежність площі монокристалу карбіду кремнію, вкритої цирконійовою плівкою, від часу відпалу за різних температур (1400–1600°C).

Fig. 8. Dependence of silicon carbide area covered by zirconium film on annealing time at various temperatures (1400–1600°C).

продукти цієї взаємодії вкривають лише чверть площі монокристалу (рис. 8).

На рисунку 8 побудовано графіки, що відображають кінетику диспергування цирконійової наноплівки на монокристалі карбіду кремнію при відпалі її за різних температур (1400–1600°C) протягом витримки при кожній температурі від 2 до 20 хвилин.

4. ВИСНОВКИ

При дослідженні кінетики диспергування цирконійових наноплівок завтовшки 100 нм, нанесених на лейкосапфір, кераміку з нітриду алюмінію, а також на монокристали діоксиду цирконію і карбіду кремнію, встановлено, що до 1400°C при короткочасному відпалі (2–5 хв.) плівки ще є практично суцільними.

Показано, що процес диспергування цирконійових наноплівок, нанесених на лейкосапфір та діоксид цирконію, при збільшенні часу відпалу при 1400°C інтенсифікується, але навіть після 20-хвилинного відпалу плівки вкривають значну частину поверхні оксидів. Приблизно такі ж результати дає відпал плівок на обох оксидах при 1500°C, що дає можливість використовувати цирконійові покриття на цих матеріалах для подальшого паяння їх за температур

до 1500°C. При підвищенні температури відпалу до 1600°C плівки починають інтенсивно диспергувати з перших хвилин відпалу і це диспергування стрімко активізується зі збільшенням часу відпалу.

Виявлено, що плівки цирконію, нанесені на карбід кремнію та нітрид алюмінію, починаючи вже з 1500°C взаємодіють з матеріалом підкладинки. Процеси розпаду цирконійової плівки на монокристалі карбиду кремнію та її взаємодії з поверхнею підкладинки відбуваються інтенсивніше, ніж на нітриді алюмінію.

Отже, паяння карбиду кремнію та нітриду алюмінію, вкритих цирконійовими плівками, можна використовувати лише до температур, не вищих за 1500°C, впродовж не більше ніж 10 хв.

Таким чином, використовуючи одержані в результаті даних досліджень графіки, можна підібрати потрібні параметри процесу паяння (температуру, час) досліджених неметалевих матеріалів, які металізовані цирконійовими наноплівками.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. F. Hafakeyama and K. Suganuma, *J. Mater. Sci.*, **21**, No. 7: 2455 (1986).
2. Ю. В. Найдич, И. И. Габ, Б. Д. Костюк, Т. В. Стецюк, Д. И. Куркова, С. В. Дукаров, *Доповіди академії наук України*, **35**: 97 (2007).
3. Ю. В. Найдич, И. И. Габ, Б. Д. Костюк Т. В. Стецюк, Д. И. Куркова, С. В. Дукаров, В. Ю. Куликовский, А. А. Оноприенко, *Адгезия расплавов и пайка материалов*, **38**: 69 (2005).
4. G. Elssner, W. Diem, and J. S. Wallace, *17 Univ. Conf. Ceram. 'Surfaces and Interfaces Ceram. and Ceram.-Metal Syst.' (July 28–August 1, 1980, Berkeley)* (New York–London: 1981), p. 629.
5. W. X. Pan, T. Okamoto, and X. S. Ning, *J. Mater. Sci.*, **29**, No. 6: 1436 (1994).
6. B. J. Dagleish, A. P. Tomsia, K. Nakashima, M. R. Locatelli, and A. M. Glaeser, *Scr. Met. et Mater.*, **31**, No. 8: 1043 (1994).
7. Ю. В. Найдич, И. И. Габ, Т. В. Стецюк, Б. Д. Костюк, С. Ф. Кузьменко, *Адгезия расплавов и пайка материалов*, **45**: 71 (2012).
8. Ю. В. Найдич, И. И. Габ, Т. В. Стецюк, Б. Д. Костюк, О. С. Литвин, *Сварочное производство*, **12**: 21 (2013).
9. С. Метфессель, *Тонкие пленки, их изготовление и измерение* (Москва–Ленинград: Госэнергоиздат: 1963) (пер. з нім.).
10. *Физическая химия конденсированных фаз, сверхтвердых материалов и их границ раздела* (Ред. В. Н. Еременко) (Киев: Наукова думка: 1975).

REFERENCES

1. F. Hafakeyama and K. Suganuma, *J. Mater. Sci.*, **21**, No. 7: 2455 (1986).
2. Yu. V. Naidich, I. I. Gab, B. D. Kostyuk, T. V. Stetsyuk, D. I. Kurkova, and S. V. Dukarov, *Dopov. Nac. Akad. Nauk Ukr.*, **35**: 97 (2007) (in Russian).
3. Yu. V. Naidich, I. I. Gab, B. D. Kostyuk, T. V. Stetsyuk, D. I. Kurkova, S. V. Dukarov, V. Yu. Kulikovskyy, and A. A. Onoprienko, *Adgeziya Rasplavov*

- i Payka Materialov*, **38**: 69 (2005) (in Russian).
4. G. Elssner, W. Diem, and J. S. Wallace, *17 Univ. Conf. Ceram. 'Surfaces and Interfaces Ceram. and Ceram.–Metal Syst.' (July 28–August 1, 1980, Berkeley)* (New York–London: 1981), p. 629.
 5. W. X. Pan, T. Okamoto, and X. S. Ning, *J. Mater. Sci.*, **29**, No. 6: 1436 (1994).
 6. B. J. Dalgleish, A. P. Tomsia, K. Nakashima, M. R. Locatelli, and A. M. Glaeser, *Scr. Met. et Mater.*, **31**, No. 8: 1043 (1994).
 7. Yu. V. Naidich, I. I. Gab, T. V. Stetsyuk, B. D. Kostyuk, and E. F. Kuzmenko, *Adgeziya Rasplavov i Payka Materialov*, **45**: 71 (2012) (in Russian).
 8. Yu. V. Naidich, I. I. Gab, T. V. Stetsyuk, B. D. Kostyuk, and O. S. Lytvin, *Svarochnoe Proizvodstvo*, **2**: 12 (1989) (in Russian).
 9. S. Methfessel, *Tonkie Plenki, Ikh Izgotovlenie i Izmerenie* (Moscow–Leningrad: Gosenergoizdat: 1963) (Russian translation).
 10. *Fizicheskaya Khimiya Kondensirovannykh Faz, Sverkhhtverdykh Materialov i Ikh Granits Razdela* (Ed. V. N. Eremenko) (Kiev: Naukova Dumka: 1975) (in Russian).