

PACS numbers: 68.35.-p, 68.37.Hk, 68.37.Ps, 68.55.-a, 68.60.Dv, 81.20.Vj, 81.40.Ef

Кінетика диспергування при відпалі у вакуумі молібденових наноплівочок, нанесених на оксидні матеріали

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

*Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
вул. Академіка Кржижановського, 3,
03142 Київ, Україна
*Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»,
вул. Львівська, 23,
03115 Київ, Україна*

Досліджено кінетику диспергування молібденових наноплівочок завтовшки у 100 нм, яких було нанесено на підкладинки з лейкосапфіру, алюмооксидної кераміки, кварцового скла та відпалено у вакуумі за температур 1200–1600°C протягом різного часу (від 2 до 20 хв.) при кожному обраному значенні температури. Встановлено, що з молібденових плівок, нанесених на оксидні матеріали, найбільш стійкою при відпалі є плівка на алюмооксидній кераміці, а найменш стійкою — плівка на кварцовому склі, яка починає інтенсивно диспергувати та взаємодіяти з поверхнею підкладинки вже за 1300°C. За результатами досліджень побудовано кінетичні криві диспергування плівок в результаті відпалу.

Ключові слова: кінетика диспергування, молібденова наноплівка, лейкосапфір, алюмооксидна кераміка, кварцове скло.

The dispersion kinetics of molybdenum nanofilms of 100 nm thickness deposited on the leucosapphire, alumina ceramics or quartz glass substrates and

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
*Open International University of Human Development 'Ukraine',
23 Lvivska Str., UA-03115 Kyiv, Ukraine*

Citation: Yu. V. Naidich, I. I. Gab, T. V. Stetsyuk, B. D. Kostyuk, and D. B. Shakhnin, Kinetics of Dispersion of the Molybdenum Nanofilms Deposited on Oxide Materials During Annealing in Vacuum, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 10: 1359–1373 (2018), DOI: 10.15407/mfint.40.10.1359.

annealed in vacuum at 1200–1600°C for different exposure times at each temperature in the interval of 2–20 min. As determined, the molybdenum film deposited on alumina ceramic is the most stable during annealing, and the least stable one is a film on quartz glass, which begins to intensively disperse and interact with the substrate surface above 1300°C. Based on the results of the investigations, the kinetic curves of films' dispersion because of annealing are plotted.

Key words: kinetics of dispersion, molybdenum nanofilms, leucosapphire, alumina ceramics, silicon glass.

Исследована кинетика диспергирования молибденовых наноплёнок толщиной 100 нм, нанесённых на подложки из лейкосапфира, алюмооксидной керамики, кварцевого стекла и отожжённых в вакууме при температурах 1200–1600°C в течение различного времени (от 2 до 20 мин) при каждом выбранном значении температуры. Установлено, что из молибденовых плёнок, нанесённых на оксидные материалы, наиболее стойкой при отжиге является плёнка на алюмооксидной керамике, а наименее стойкой — плёнка на кварцевом стекле, которая начинает интенсивно диспергироваться и взаимодействовать с поверхностью подложки уже при 1300°C. По результатам исследований построены кинетические кривые диспергирования плёнок в результате отжига.

Ключевые слова: кинетика диспергирования, молибденовая наноплёнка, лейкосапфир, алюмооксидная керамика, кварцевое стекло.

(Отримано 4 квітня 2018 р.)

1. ВСТУП

При з'єднанні багатьох неметалевих матеріалів, зокрема оксидної та неоксидної кераміки, монокристалів, вуглеграфітних, а також деяких інших, часто застосовуються металеві покриття різних товщин, нанесені на неметалеві матеріали [1–5].

Найчастіше для лютування використовують титан [6–12]; також застосовують для цих цілей ніобій і гафній [13–20], оскільки ці два метали становлять значний інтерес для одержання за їх допомогою високотемпературних з'єднань кераміки з керамікою та металами.

Тонкі плівки металів (в інтервалі нанотовщин), що нанесені на неметалеві неорганічні матеріали, мають першорядне значення при процесах з'єднання (лутування) неметалів (кераміка, скло, монокристали, вуглецеві матеріали, надтверді матеріали). Металізація поверхонь таких матеріалів забезпечує достатнє змочування їх розтопленими металами, що визначає саму технологічну можливість формування лютованого з'єднання, а також зумовлює міцність та інші властивості з'єднань.

Оскільки у процесі лютування або зварювання тиском металізовані неметалеві деталі мають бути нагрітими до достатньо ви-

соких температур (1000–1600°C), вивчення процесів диспергування — коагулювання, які відбуваються при відпалі в цих металевих наноплівках завтовшки у 100 нм, становить не тільки пізнавальний інтерес, але й практичне значення для розробки технологічних режимів з'єднання неметалевих матеріалів.

Широке застосування в техніці має молибден, який використовують для лютування різномірних матеріалів переважно для електронної та радіотехнічної промисловостей за молибдено-мангановою технологією [12, 21, 22], а також у вигляді наноплівкових покриттів для елементів запису інформації, оптичних комірок, елементів сонячних батарей, молибденових дзеркал тощо [23–25].

Молибденові покриття завтовшки у 100–200 нм, нанесені на неметалеві матеріали, становлять значний інтерес з метою застосування цих покриттів для подальшого лютування металізованих ними матеріалів.

Отже, вивчення поведінки цих плівок при відпалі становить значний науковий і практичний інтерес.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

У даній роботі використовували електронно-променевий спосіб напорошення металевих та неметалевих наноплівок за допомогою електронно-променевого устаткування ЕЛУ-5.

Товщину нанесених наноплівок вимірювали двома методами:

1) метал заданої ваги (розрахований для плівок потрібної товщини) повністю випаровують; тоді товщина плівки може бути легко розрахованою за Лямбертовим законом [26, 27];

2) за допомогою спеціального кварцового датчика, який знаходиться у вакуумній камері напорошення безпосередньо біля зразка, на який напорошують плівку.

Тверді неметалеві підкладинки було виготовлено з лейкосапфіру, кварцового скла та кераміки на основі Al_2O_3 . Вони являли собою невеликі тонкі пластинки розмірами $4 \times 3 \times 2$ мм³. Одна з пласких поверхонь кожного зразка була добре відполірована до шерсткості $R_z = 0,03-0,05$ мкм. Після полірування всі зразки були ретельно знежирені та відпалені у вакуумі при температурі 1100°C протягом однієї години.

В якості металу, який наносили на неметалеві поверхні, було використано молибден.

Якість всіх нанесених наноплівок контролювали за допомогою металографічного мікроскопу XJL-17.

Зразки з нанесеними на них металевими плівками відпалювали у вакуумній камері протягом різних проміжків часу (від 2 до 20 хв.) та за різних температур (від 1200 до 1600°C) у вакуумі не менше, ніж $2 \cdot 10^{-3}$ Па.

Відпалені зразки досліджували за допомогою сканувальних електронних мікроскопів JSM-6700F, Neo Scope JSM-5000 та атомно-силового мікроскопу NanoScope IIIa, одержуючи при цьому мікрофотографії. З використанням цих мікрофотографій було визначено площі острівців металу на поверхні неметалевих зразків планіметричною методою, тобто шляхом визначення ваги вирізаних з паперових відбитків мікрофотографій елементів металізованих поверхонь зразків [28]. Одержані експериментальні дані було представлено у вигляді графіків, які демонструють залежність площ поверхонь зразків, вкритих металевими наноплівками від параметрів відпалу (температура, час).

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Вихідна плівка молібдену на лейкосапфірі була суцільною і залишилася практично незмінною при нагріванні її до 1200°C. Перші ознаки порушення суцільності плівки з'явилися після її п'ятихвилинного відпалу при 1200°C (рис. 1, *a*), а при подаль-

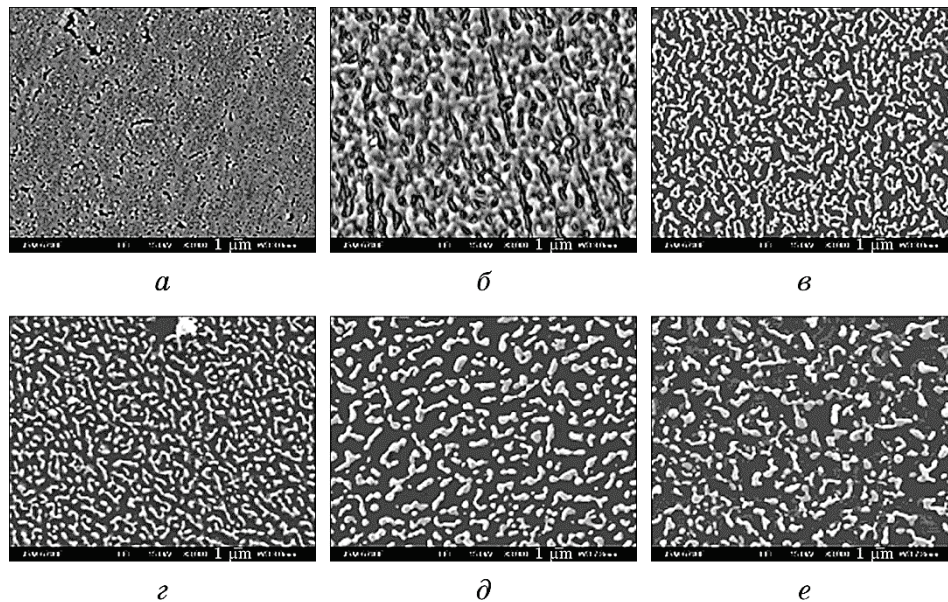


Рис. 1. СЕМ-зображення плівки молібдену завтовшки 100 нм на лейкосапфірі, відпаленої у вакуумі, $\times 3000$: *a* — 1200°C, 5 хв.; *б* — 1200°C, 20 хв.; *в* — 1300°C, 20 хв.; *г* — 1400°C, 20 хв.; *д* — 1500°C, 20 хв.; *е* — 1600°C, 10 хв.

Fig. 1. SEM images of molybdenum film of 100 nm thickness on leucosapphire annealed in vacuum, $\times 3000$: *a*—1200°C, 5 min; *б*—1200°C, 20 min; *в*—1300°C, 20 min; *г*—1400°C, 20 min; *д*—1500°C, 20 min; *е*—1600°C, 10 min.

шому збільшенні витримки за цієї температури процес диспергування плівки інтенсифікувався, і після двадцятихвилинного відпалу плівка вкривала близько 85% поверхні лейкосапфірової підкладинки (рис. 1, б).

Подальше підвищення температури відпалу звичайно пришвидшило процес диспергування плівки, і перші ознаки порушення її цілісності з'явилися вже після двоххвилинного відпалу при 1300°C, а при подальшому збільшенні витримки до 10 хв. плівка вже значно диспергувала, і після двадцятихвилинного відпалу плівка вже розпалася на окремі фрагменти, які вкривали не більше ніж 70% поверхні підкладинки (рис. 1, в).

Після підвищення температури відпалу до 1400°C стали добре помітними ознаки диспергування плівки вже після двоххвилинної витримки, а з подальшим збільшенням часу витримки при цій температурі до десяти хвилин інтенсивність розпаду плівки зростала, і після двадцятихвилинного відпалу фрагменти плівки вкривали близько 60% поверхні підкладинки (рис. 1, г).

З підвищенням температури відпалу до 1500°C інтенсивність розпаду плівки зростала, але не дуже, а після двадцятихвилинного відпалу залишки плівки вкривали лише близько 50% (рис. 1, д).

Мікрофотографія цієї стадії розпаду плівки (рис. 2, а), зроблена за допомогою атомно-силового мікроскопу, свідчить, що плівка значно диспергувала та коагулювала. Висота її фрагментів збільшилася у деяких краплях до 300 нм (рис. 2, б, в), але ще зберігається адгезія плівки до підкладинки.

Процес диспергування плівки значно прискорився зі збільшенням температури її відпалу до 1600°C. Так, ступінь розпаду плівки був досить значним вже після двоххвилинної витримки при цій температурі, і з подальшим збільшенням часу витримки інтенсивність розпаду плівки значно збільшилася (рис. 1, е), а після двадцятихвилинного відпалу залишки плівки вкривали менше третини площі підкладинки (рис. 3).

На рисунку 3 наведено кінетичні криві розпаду молібденової наноплівки на лейкосапфірі, залежно від температури відпалу та часу витримки при кожній температурі. Отже, лютування металізованого молібденом лейкосапфіру можна виконувати при температурах до 1300°C у разі довготривалого процесу. При температурах 1400°C та 1500°C лютування також можливе, але тривалість процесу слід обмежити десятьма та п'ятьма хвилинами відповідно.

Вихідна плівка молібдену на алюмооксидній кераміці, як і на лейкосапфірі, була суцільною. Перші ознаки порушення цілісності плівки з'явилися після двоххвилинного відпалу при 1200°C, і з подальшим збільшенням часу витримки при цій температурі до п'ятих хвилин (рис. 4, а) плівка майже не змінювалася. В атомно-силовому мікроскопі при великому збільшенні можна помітити

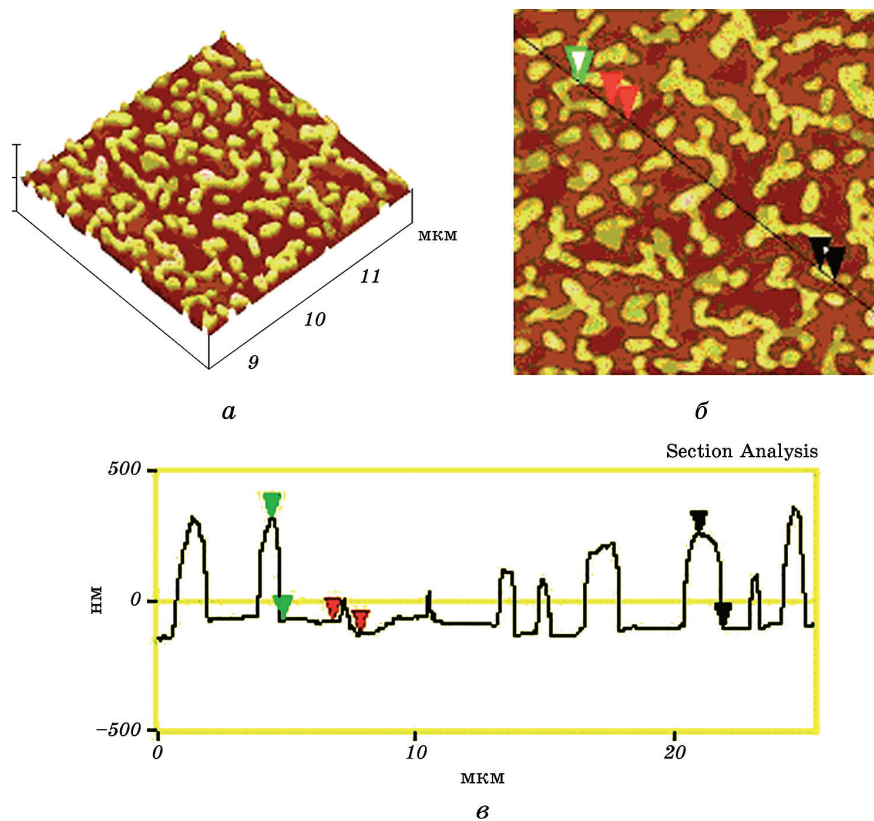


Рис. 2. АСМ-зображення плівки молібдену завтовшки 100 нм на лейкосапфірі, відпаленої при 1500°C протягом 20 хв. у вакуумі: *а* — тривимірне зображення, *б* — зображення з перетинами, за якими вимірювалась профілограма плівки, *в* — профілограма плівки.

Fig. 2. AFM images of molybdenum film of 100 nm thickness on leucosapphire after annealing at 1500°C during 20 min in vacuum: *a*—three-dimensional image, *б*—image with intersections, on which the film profile was measured, *в*—film profile.

(рис. 5, *а*), що плівка почала потроху спучуватися та розпадатися на великі конгломерати, які ще тісно пов'язані між собою. При цьому товщина конгломератів зберігається на рівні вихідної плівки, тобто 100 нм (рис. 5, *б* і *в*). При збільшенні часу витримки при 1200°C до двадцятих хвилин вигляд плівки зазнав незначних змін.

Підвищення температури до 1300°C в діапазоні часу витримки від двох до десятих хвилин не внесло істотних змін у морфологію плівки в порівнянні з відпалом при 1200°C, і лише після двадцятихвилинної витримки відбулося істотне диспергування плівки (рис. 4, *б*).

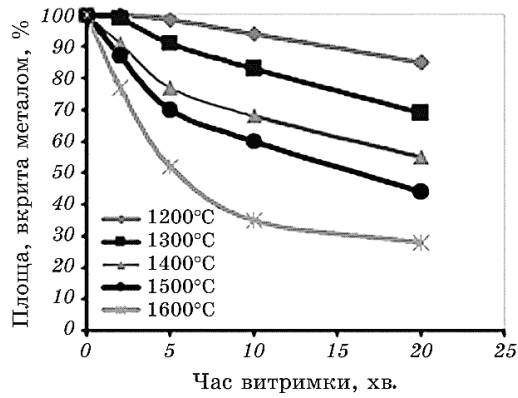


Рис. 3. Залежність площі лейкосафіру, вкритої молібденовою плівкою, від часу відпалу при різних температурах (1200–1600°C).

Fig. 3. Leucosapphire area covered by molybdenum film depending on annealing time at various temperatures (1200–1600°C).

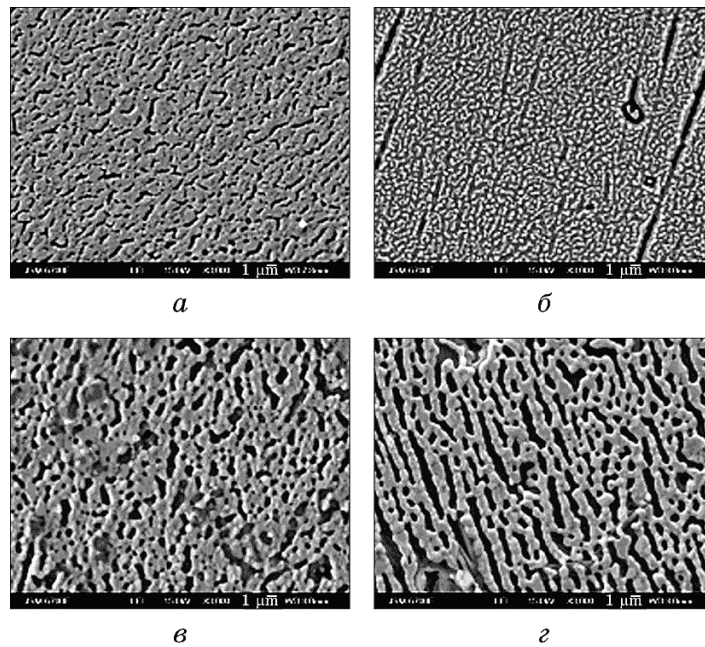


Рис. 4. SEM-зображення плівки молібдену завтовшки 100 нм на алюмо-оксидній кераміці, відпаленої у вакуумі, $\times 3000$: *a* — 1200°C, 5 хв.; *б* — 1300°C, 20 хв.; *в* — 1500°C, 20 хв.; *г* — 1600°C, 20 хв.

Fig. 4. SEM images molybdenum film of 100 nm thickness on alumina annealed in vacuum, $\times 3000$: *a*—1200°C, 5 min; *б*—1300°C, 20 min; *в*—1500°C, 20 min; *г*—1600°C, 20 min.

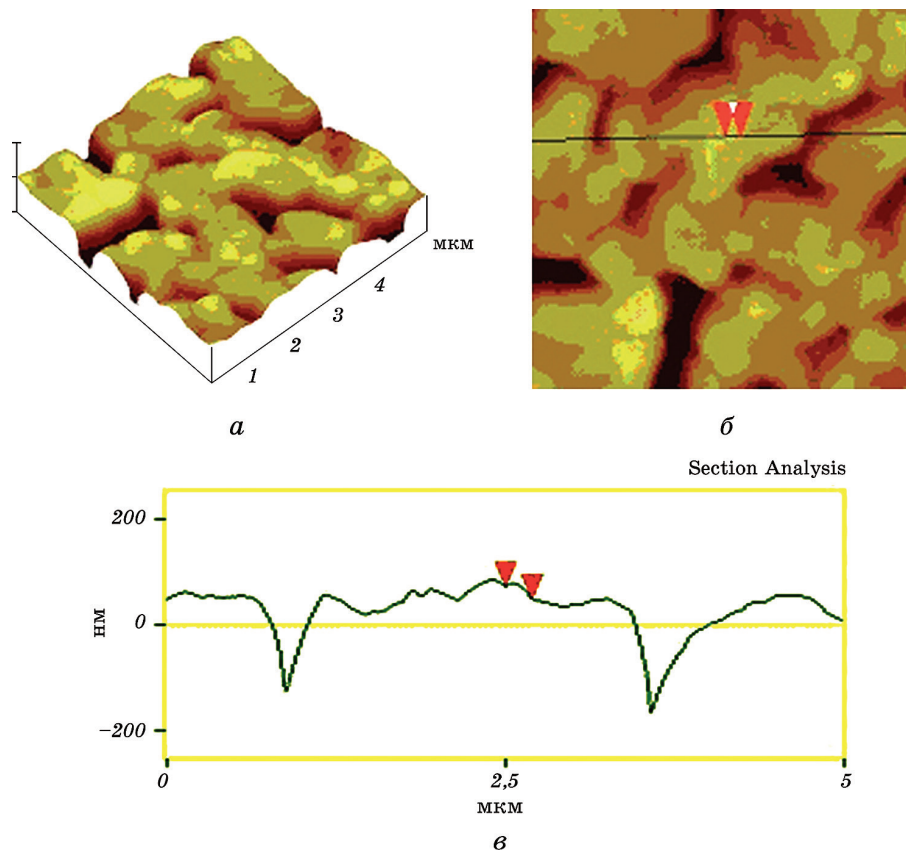


Рис. 5. АСМ-зображення плівки молібдену завтовшки 100 нм на алюмо-оксидній кераміці, відпаленої при 1200°C протягом 5 хв. у вакуумі: *a* — тривимірне зображення, *б* — зображення з перетинами, по яким вимірювалась профілограма плівки, *в* — профілограма плівки.

Fig. 5. AFM image of molybdenum film of 100 nm thickness on alumina after annealing at 1200°C during 5 min in vacuum: *a*—three-dimensional image, *б*—image with intersections, on which the film profile was measured, *в*—film profile.

Подальше підвищення температури відпалу до 1400°C, а потім і до 1500°C практично мало змінило ступінь диспергування плівки, і лише після десятих хвилин витримки при 1500°C плівка почала істотно диспергувати, а після двадцятихвилинного відпалу її фрагменти вкривали близько 70% поверхні підкладки (рис. 4, *в*).

Відпал при 1600°C значно пришвидшив диспергування плівки, яке стало помітним вже після двохвилинної витримки і з подальшим збільшенням часу витримки пришвидшилося, що призвело до значного розпаду плівки після двадцятихвилинної витримки за цієї

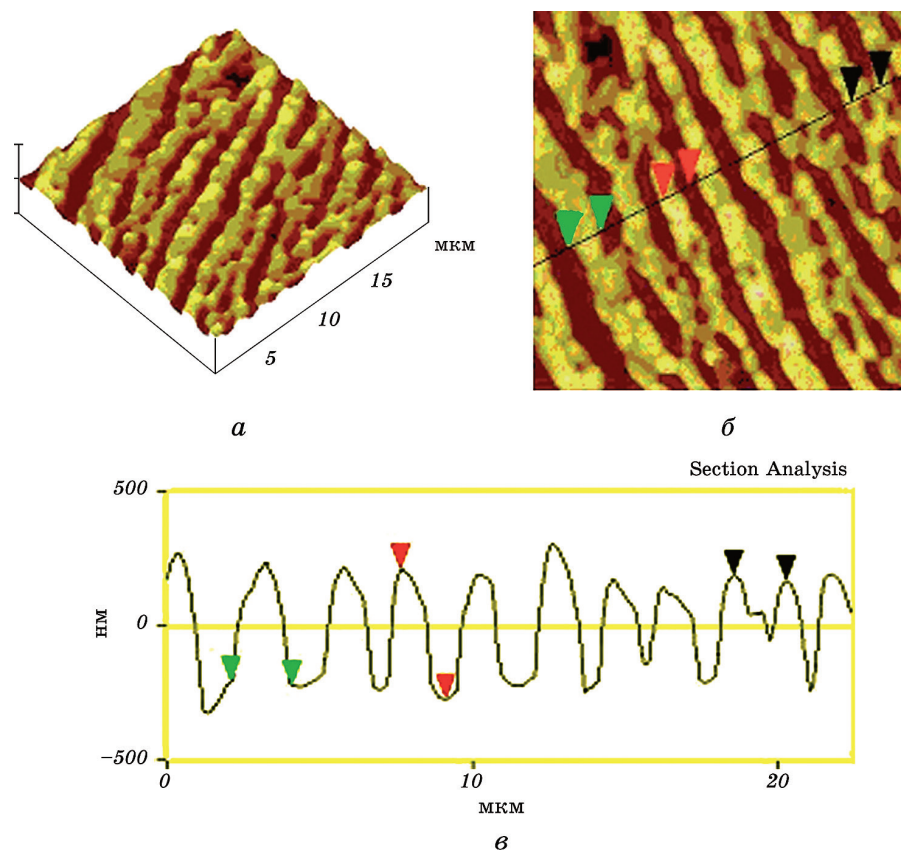


Рис. 6. АСМ-зображення плівки молібдену завтовшки 100 нм на алюмооксидній кераміці, відпаленої при 1600°C протягом 20 хв. у вакуумі: *a* — тривимірне зображення, *б* — зображення з перетинами, по яким вимірювалась профілограма плівки, *в* — профілограма плівки.

Fig. 6. AFM image of molybdenum film of 100 nm thickness on alumina after annealing at 1600°C during 20 min in vacuum: *a*—three-dimensional image, *б*—image with intersections, on which the film profile was measured, *в*—film profile.

температури, у результаті чого довгі фрагменти плівки вкривали близько половини площі підкладинки (рис. 4, *з*). На мікрофотографії цієї стадії розпаду плівки (рис. 6, *а*), зробленій за допомогою атомно-силового мікроскопу, видно, що ці фрагменти складаються з коротших фрагментів, які тісно поєднані між собою та складають довгі ланцюги, висота яких сягає 250 нм (рис. 6, *б*, *в*).

На рисунку 7 наведено криві швидкості та ступеня розпаду молібденової плівки на алюмооксидній кераміці, залежно від температури та часу відпалу.

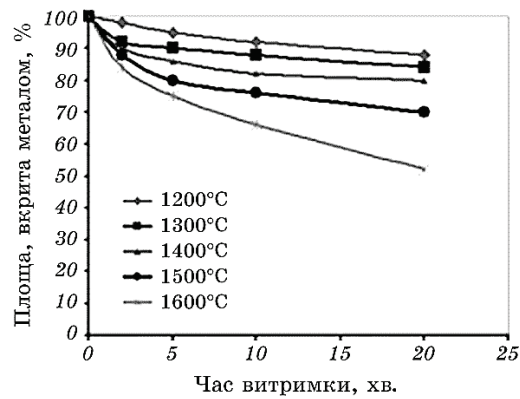


Рис. 7. Залежність площі алюмооксидної кераміки, вкритої молібденовою плівкою, від часу відпалу при різних температурах (1200–1600°C).

Fig. 7. Alumina area covered by molybdenum film depending on annealing time at various temperatures (1200–1600°C).

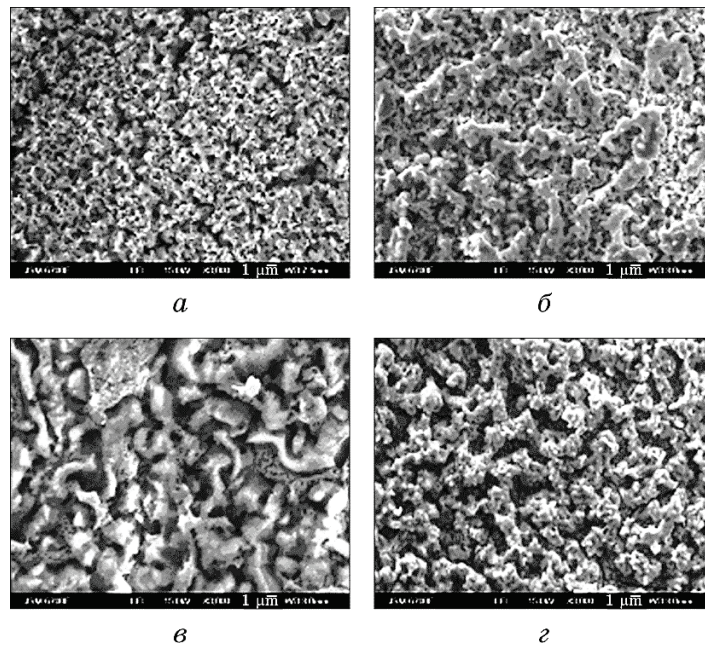


Рис. 8. СЕМ-зображення плівки молібдену завтовшки 100 нм на кварцовому склі, відпаленої у вакуумі, $\times 3000$: *a* — 1200°C, 10 хв.; *б* — 1400°C, 2 хв.; *в* — 1500°C, 2 хв.; *г* — 1500°C, 5 хв.

Fig. 8. SEM images of molybdenum film of 100 nm thickness on quartz glass annealed in vacuum, $\times 3000$: *a*—1200°C, 10 min; *б*—1400°C, 2 min; *в*—1500°C, 2 min; *г*—1500°C, 20 min.

Якщо порівняти кінетику диспергування молібденової плівки на алюмооксидній кераміці та лейкосапфірі, то можна побачити, що вони достатньо подібні, але на алюмооксидній кераміці плівка диспергує дещо повільніше, мабуть, за рахунок пор і домішок, які є в кераміці. Згідно з одержаними результатами досліджень, лютування металізованої молібденом алюмооксидної кераміки можна виконувати при 1500°C за тривалості процесу лютування протягом двадцятьох хвилин, а при 1600°C можливе лютування лише за тривалості процесу, більшої десятих хвилин, коли плівка ще вкриває більше за 70% поверхні підкладки і ще немає дуже інтенсивної взаємодії молібдену з керамікою.

Суцільна вихідна молібденова наноплівка, нанесена на кварцове скло, залишалася незмінною при відпалі її навіть до 1200°C. Перші ознаки диспергування з'являються у плівці після двохвилинного відпалу при 1200°C. Диспергування стає все більш значним зі збільшенням часу витримки до десятих (рис. 8, а), а потім і двадцятьох хвилин, причому, з огляду на форму руйнування плівки, є вірогідним, що вже за цієї температури є певна взаємодія плівки з поверхнею кварцового скла, і ця взаємодія істотно інтенсифікується при подальшому збільшенні як температури відпалу, так і часу витримки за кожної температури. Після відпалу при 1300°C взаємодія плівки з поверхнею кварцового скла спостерігається одночасно з диспергуванням плівки вже після двохвилинної витримки, і ця взаємодія посилюється зі збільшенням часу витримки до двадцятьох хвилин.

Взаємодія плівки з кварцовою підкладкою ще більш посилюється в результаті відпалу при 1400°C, причому, вірогідно, утворюються нові фази (рис. 8, б), і цей процес сягає апогею в результаті відпалу при 1500°C, коли досить стрімко взаємодія спостерігається вже після двохвилинної витримки (рис. 8, в). При п'ятихвилинному відпалі ця взаємодія ще посилюється (рис. 8, г). Це добре видно при великому збільшенні на мікрофотографії плівки (рис. 9, а), зробленій за допомогою атомно-силового мікроскопу. На цій фотографії можна побачити більш ясну картину взаємодії плівки молібдену з кварцовим склом, в результаті якої утворюється нова фаза, яка складається з великих конгломератів з розмитими контурами, які тісно поєднані між собою. Поміж конгломератами, висота яких становить менше ніж 100 нм, є великі порожнини шириною до 2 мкм (рис. 9, б, в).

Графіки залежності ступеня розпаду молібденової плівки на кварцовому склі, залежно від температур відпалу та часу витримки при кожній температурі, наведено на рис. 10. Згідно з цими графіками, лютування кварцового скла, металізованого молібденом, варто виконувати за температур, не вищих за 1300°C, коли ще плівка вкриває більше 70% поверхні підкладки і ще немає

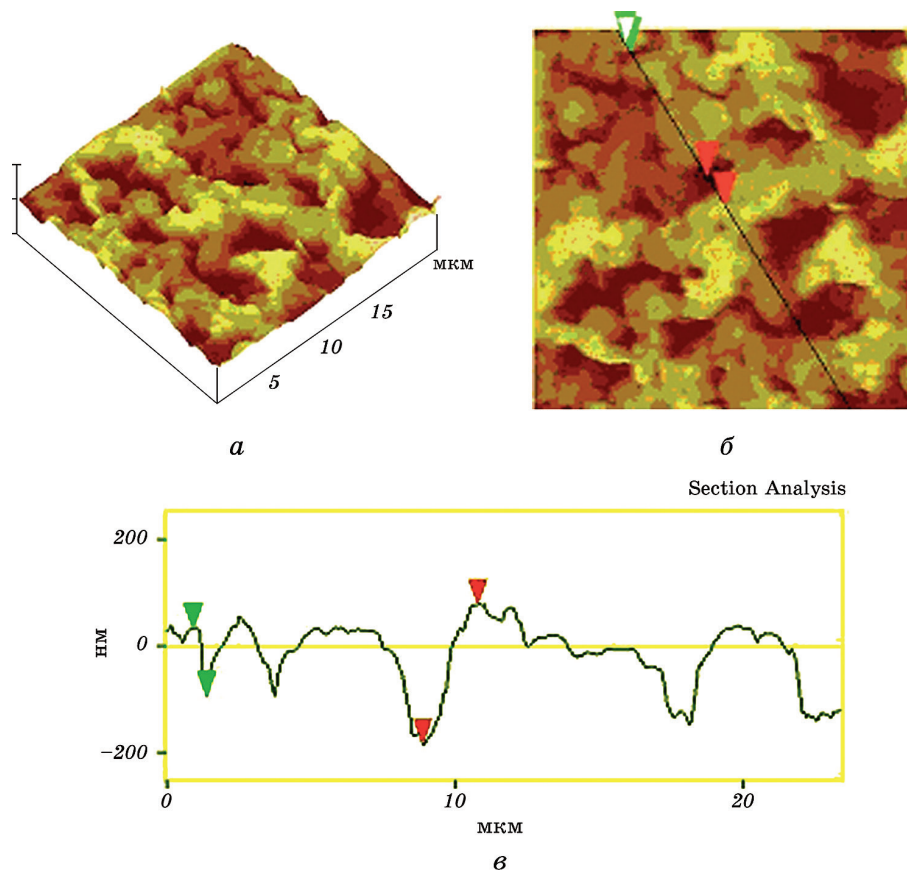


Рис. 9. АСМ-зображення плівки молібдену завтовшки 100 нм на кварцовому склі, відпаленої при 1500°C протягом 5 хв. у вакуумі: *a* — тривимірне зображення, *б* — зображення з перетинами, по яким вимірювалась профілограма плівки, *в* — профілограма плівки.

Fig. 9. AFM image of molybdenum film of 100 nm thickness on quartz glass annealed at 1500°C during 5 min in vacuum: *a*—three-dimensional image, *б*—image with intersections, on which the film profile was measured, *в*—film profile.

дуже інтенсивної взаємодії плівки з кварцовим склом.

4. ВИСНОВКИ

При дослідженні кінетики диспергування при відпалі у вакуумі молібденових наноплівоч завтовшки у 100 нм, нанесених на оксидні матеріяли (кварцове скло, лейкосапфір та алюмооксидна кераміка), встановлено, що перші ознаки диспергування плівок

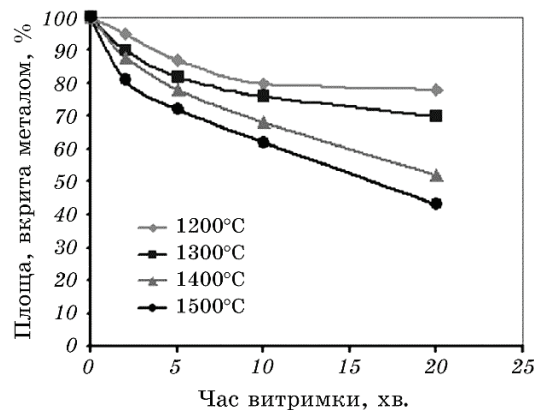


Рис. 10. Залежність площі кварцового скла, вкритого молібденовою плівкою, від часу відпалу при різних температурах (1200–1500°C).

Fig. 10. Quartz glass area covered by molybdenum film depending on annealing time at various temperatures (1200–1500°C).

з'являються лише після відпалу їх при 1200°C. Виявлено, що найбільш стійкою є плівка на алюмооксидній кераміці, яка навіть після двадцятихвилинного відпалу при 1600°C вкриває близько 50% площі підкладки, а найменш стійкою виявилася плівка на кварцовому склі, яка починає інтенсивно диспергувати та взаємодіяти з поверхнею підкладки вже при 1300°C.

За результатами досліджень побудовано кінетичні криві диспергування плівок при їх відпалі в діапазоні температур 1200–1600°C, на основі яких можна розробити технологічні режими лютування даних оксидних матеріалів.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. G. Elssner, W. Diem, and J. S. Wallace, *17th Univ. Conf. Ceram. 'Surfaces and Interfaces Ceram. and Ceram.—Met. Syst.'* (Jul. 28–Aug. 1, 1980, Berkeley, CA) (New York–London: 1981).
2. W. X. Pan, T. Okamoto, and X. S. Ning, *J. Mater. Sci.*, **29**, Iss. 6: 1436 (1994).
3. B. J. Dalgleish, A. P. Tomsia, K. Nakashima, M. R. Locatelli, and A. M. Glaeser, *Scripta Metall. et Mater.*, **31**, Iss. 8: 1043 (1994).
4. M. Z.-C. Hu, R. D. Hunt, E. A. Payzant, and C. R. Hubbard, *J. Am. Ceram. Soc.*, **82**, Iss. 9: 2313 (1999).
5. R. R. Piticescu, C. Monty, D. Taloi, A. Motoc, and S. Axinted, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **21**, Iss. 10–11: 2057 (2001).
6. Ю. В. Найдич, *Контактные явления в металлических расплавах* (Київ: Наукова думка: 1972).
7. H. J. Kang, C. H. Kim, N. S. Park, and M. W. Kim, *J. App. Surf. Sci.*, **100–101**: 160 (1996).

8. Е. В. Коганицкая, *Электроника*, № 4: 86 (1959).
9. F. L. Harding and D. R. Rossington, *J. Am. Ceram. Soc.*, **53**, Iss. 2: 87 (1970).
10. Ю. В. Найдич, И. И. Габ, В. С. Журавлев, В. Ф. Дуброва, А. Н. Гордыня, *Сварочное производство*, № 2: 12 (1989).
11. S. K. Rhee, *J. Am. Ceram. Soc.*, **54**, Iss. 7: 332 (1971).
12. И. И. Метелкин, М. А. Павлова, Н. В. Поздеева, *Сварка керамики с металлами* (Москва: Металлургия: 1977).
13. В. В. Мельников, С. В. Еремеев, С. Е. Кулькова, *Журнал технической физики*, **81**, № 10: 114 (2011).
14. Q. Tong, L. Cheng, and L. Zhang, *J. Aviation Mater.*, **24**, No. 1: 53 (2004)
15. M. Naka, T. Saito, and I. Okamoto, *Transaction of JWRI*, **17**, Iss. 2: 67 (1988).
16. M. L. Shalz, B. J. Dalgleish, A. P. Tomsia, R. M. Cannon, and A. M. Glaeser, *J. Mater. Sci.*, **29**, Iss. 14: 3678 (1994).
17. R. A. Marks, J. D. Sugar, and A. M. Glaeser, *J. Mater. Sci.*, **36**, Iss. 23: 5609 (2001).
18. R. A. Marks, D. R. Chapman, D. T. Danielson, and A. M. Glaeser, *Acta Mater.*, **48**, Iss. 18–19: 4425 (2000).
19. И. И. Габ, В. С. Журавлев, Д. И. Куркова, Т. В. Стецюк, Ю. В. Найдич, *Порошковая металлургия*, № 7/8: 69 (1997).
20. Э. С. Каракозов, И. С. Котелкин, Г. Н. Матвеев, А. Р. Меркулов, М. Х. Шоршоров, *Физика и химия обработки материалов*, № 3: 123 (1968).
21. В. Н. Батыгин, И. И. Метелкин, А. М. Решетников, *Вакуумноплотная керамика и ее спаи с металлами* (Москва: Энергия: 1982).
22. В. Е. Хряпин, *Справочник паяльщика* (Москва: Машиностроение: 1981).
23. А. В. Волков, О. Ю. Мойсеев, С. Д. Полетаев, *Компьютерная оптика*, **37**, № 2: 220 (2013).
24. S.-F. Wang, H.-Ch. Yang, Ch.-F. Liu, and H.-Yu. Y. Bor, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, **2014**, Article ID 531401.
25. А. В. Рогов, К. Ю. Вуколов, *Журнал технической физики*, **76**, № 4: 109 (2006).
26. С. Метфессель, *Тонкие плёнки, их изготовление и измерение* (Москва–Ленинград: Госэнергоиздат: 1963) (пер. з нім.).
27. *Физика тонких плёнок: Сборник* (Ред. Г. Хаас, Р. Э. Тун) (Москва: Мир: 1968) (пер. з англ.).
28. Ю. В. Найдич, И. И. Габ, Б. Д. Костюк, Т. В. Стецюк, Д. И. Куркова, С. В. Дукаров, *Доповіди Національної академії наук України*, № 5: 97 (2007).

REFERENCES

1. G. Elssner, W. Diem, and J. S. Wallace, *17 Univ. Conf. Ceram. 'Surfaces and Interfaces Ceram. and Ceram.–Met. Syst.'* (Jul. 28–Aug. 1, 1980, Berkeley, CA) (New York–London: 1981).
2. W. X. Pan, T. Okamoto, and X. S. Ning, *J. Mater. Sci.*, **29**, Iss. 6: 1436 (1994).
3. B. J. Dalgleish, A. P. Tomsia, K. Nakashima, M. R. Locatelli, and A. M. Glaeser, *Scripta Metall. et Mater.*, **31**, Iss. 8: 1043 (1994).
4. M. Z.-C. Hu, R. D. Hunt, E. A. Payzant, and C. R. Hubbard., *J. Am. Ceram. Soc.*, **82**, Iss. 9: 2313 (1999).

5. R. R. Piticescu, C. Monty, D. Taloi, A. Motoc, and S. Axinted, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **21**, Iss. 10–11: 2057 (2001).
6. Yu. V. Naidich, *Kontaktnye Yavleniya v Metallicheskih Rasplavakh* (Kiev: Naukova Dumka: 1972) (in Russian).
7. H. J. Kang, C. H. Kim, N. S. Park, and M. W. Kim, *J. App. Surf. Sci.*, **100–101**: 160 (1996).
8. E. V. Koganitskaya, *Elektronika*, No. 4: 86 (1959) (in Russian).
9. F. L. Harding and D. R. Rossington, *J. Am. Ceram. Soc.*, **53**, Iss. 2: 87 (1970).
10. Yu. V. Naidich, I. I. Gab, V. S. Zhuravlev, V. F. Dubrova, and A. N. Gordynya, *Svarochnoe Proizvodstvo*, No. 2: 12 (1989) (in Russian).
11. S. K. Rhee, *J. Am. Ceram. Soc.*, **54**, Iss. 7: 332 (1971).
12. I. I. Metelkin, M. A. Pavlova, and N. V. Pozdeeva, *Svarka Keramiki s Metallami* (Moscow: Metallurgiya: 1977) (in Russian).
13. V. V. Melnikov, S. V. Yermeev, and S. Ye. Kulkova, *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*, **81**, No. 10: 114 (2011) (in Russian).
14. Q. Tong, L. Cheng, and L. Zhang, *J. Aviation Mater.*, **24**, No. 1: 53 (2004).
15. M. Naka, T. Saito, and I. Okamoto, *Transaction of JWRI*, **17**, Iss. 2: 67 (1988).
16. M. L. Shalz, B. J. Dalglish, A. P. Tomsia, R. M. Cannon, and A. M. Glaeser, *J. Mater. Sci.*, **29**, Iss. 14: 3678 (1994).
17. R. A. Marks, J. D. Sugar, and A. M. Glaeser, *J. Mater. Sci.*, **36**, Iss. 23: 5609 (2001).
18. R. A. Marks, D. R. Chapman, D. T. Danielson, and A. M. Glaeser, *Acta Mater.*, **48**, Iss. 18–19: 4425 (2000).
19. I. I. Gab, V. S. Zhuravlev, D. I. Kurkova, T. V. Stetsyuk, and Yu. V. Naidich, *Poroshkovaya Metallurgiya*, Nos. 7/8: 69 (1997) (in Russian).
20. E. S. Karakozov, I. S. Kotelkin, G. N. Matveev, A. R. Merkulov, and M. Kh. Shorshorov, *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, No. 3: 123 (1968) (in Russian).
21. V. N. Batygin, I. I. Metelkin, and A. M. Reshetnikov, *Vakuumnopltnaya Keramika i Ee Spai s Metallami* (Moscow: Energiya: 1982) (in Russian).
22. V. E. Khryapin, *Spravochnik Payalshchika* (Moscow: Mashinostroenie: 1981) (in Russian).
23. A. V. Volkov, O. Yu. Moiseev, and S. D. Poletaev, *Kompyuternaya Optika*, **37**, No. 2: 220 (2013) (in Russian).
24. S.-F. Wang, H.-Ch. Yang, Ch.-F. Liu, and H.-Yu. Y. Bor, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, **2014**, Article ID 531401.
25. A. V. Rogov and K. Yu. Vukolov, *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*, **76**, No. 4: 109 (2006) (in Russian).
26. S. Methfessel, *Tonkie Plyenki, Ikh Izgotovlenie i Izmerenie* [Dünne Schichten (Ihre Herstellung und Messung)] (Moscow–Leningrad: Gosenergoizdat: 1963) (Russian translation).
27. G. Haas and R. E. Thun, *Fizika Tonkikh Plyonok* [Physics of Thin Films] (Moscow: Mir: 1968) (Russian translation).
28. Yu. V. Naidich, I. I. Gab, B. D. Kostyuk, T. V. Stetsyuk, D. I. Kurkova, and S. V. Dukarov, *Dopov. Nac. Akad. Nauk Ukr.*, No. 5: 97 (2007) (in Russian).