

Наукові основи створення високоентропійних нітридних, карбідних, боридних та оксидних нанопокриттів на твердому сплаві Т12А

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»*

Було досліджено можливість створення високоентропійних нітридних, карбідних, боридних та оксидних нанопокриттів на твердому сплаві Т12А на основі гафнію, цирконію, молібдену, вольфраму, ітрію і нікелю. Проведено дослідження отримання нітридних, карбідних, боридних та оксидних покриттів і нітридів, карбідів, боридів, оксидів безпосередньо в тілі матеріалу при енергіях іонів у діапазоні від 200 до $2 \cdot 10^4$ eV із зарядовими числами від 1 до 3. Отримано важливі характеристики: об'єм зерна для всіх перерахованих іонів та іонів азоту, вуглецю, бору та кисню і глибини їх залягання, що дозволяє оцінити шари наноструктур або субмікроструктур, у яких можуть бути створені ці високоентропійні покриття. Показано, що є можливість уникнути отримання інтерметалідів завдяки високій рухливості іонів азоту.

Ключові слова: високоентропійні покриття, субмікроструктури, наноструктури, твердий розчин, інтерметаліди, нітриди, бориди, карбіди, оксиди.

Вступ

Дослідження високоентропійних сплавів показали, що вони завдяки утворенню твердих розчинів мають високу твердість і мають інші високі фізико-механічні характеристики [1–3]. Є спроби створювати покриття з високоентропійних сплавів [4] і навіть експериментально отримувати нітриди на основі високоентропійних сплавів, але теоретичних робіт у галузі створення шарів із нітридних, карбідних, боридних та оксидних високоентропійних покриттів немає.

Все це свідчить про актуальність та своєчасність створення теорії отримання наноструктурних високоентропійних покриттів на матеріалі різальних інструментів.

Поява нового класу матеріалів – високоентропійних сплавів, їх застосування може суттєво покращити фізико-механічні характеристики деталей та ріжучого інструменту (PI), але до них входять дорогі складові: гафній, цирконій, вольфрам, молібден та інші рідкісноземельні метали. Використовуючи ці метали, можна створювати нітридні, карбідні, боридні та оксидні покриття на поверхні PI, та їх характеристики можуть бути такими ж або навіть вищими, ніж у високоентропійних сплавів.

Необхідно, щоб у складі високоентропійних сплавів було щонайменше п'ять різних елементів. Зі збільшенням числа елементів ентропія зростає, очевидно, те саме буде і зі збільшенням числа карбідів, нітридів, оксидів і боридів. Причому одного елемента має бути трохи більше 30 %. Очевидно, для таких покриттів з'являються нові можливості, про які ми ще й не підозрюємо, так як вони можуть створювати тверді розчини, що мають надвисокі фізико-механічні характеристики, і утворювати інтерметаліди, що мають високу пластичність, що при їх малій кількості сприяють реалізації якості покриттів, які ефективно протистоятимуть ударним навантаженням. Все це свідчить про своєчасність та важливість проведених досліджень. Враховуючи адгезійні взаємодії відповідних нітридів, карбідів, боридів та оксидів з оброблюваним матеріалом, можна вибирати поверхневі шари з мінімальною адгезійною взаємодією, що суттєво зменшить адгезійне зношування

покриття на PI та знизить сили різання. Це підвищить з урахуванням освіти наноструктур (НС) працездатність та ефективність ріжучих інструментів.

Робота виконана в рамках програми Міністерства освіти і науки України «Нові ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі» (підсекція 13 «Аерокосмічна техніка та транспорт») за темами: «Створення фізико-технічних засад підвищення якості матеріалів аерокосмічних конструкцій» та «Розробка технологічних основ інтегрованих технологій плазмово-іонної обробки деталей аерокосмічної техніки» (підсекція 6 «Фізико-технічні проблеми матеріалознавства»), «Концепція створення наноструктур, нано- та традиційних покриттів з урахуванням впливу адгезії на ефективність та працездатність деталей АТ, АТ та PI», «Експериментально-теоретичне дослідження отримання наноструктур при дії іонних та світлопроменевих потоків на конструкційні матеріали та PI», госпдоговірних робіт та договорів про співпрацю.

1. Стан питання

В даний час широко розглядається питання про створення високоентропійних сплавів, які можуть знайти застосування в техніці завдяки високій твердості, міцності при значних температурах, значно меншій повзучості порівняно з традиційними конструкційними матеріалами, що також є важливою характеристикою [1–5]. У той же час питання отримання НС як у високоентропійних сплавах, так і в покриттях з цих сплавів, навіть експериментально практично не вивчений (існують уривчасті дані про можливість отримання НС), а теоретичних робіт з отримання НС, за винятком наших [6–11], немає.

Все це свідчить про те, що є суттєва необхідність у розвитку робіт з одержання покриттів із нітридів, карбідів, боридів, оксидів та інших твердих сполук у разі утворення високоентропійного покриття.

2. Результати розрахунків та обговорення

Було досліджено можливість створення високоентропійних нітридних, карбідних, боридних та оксидних покриттів на твердому сплаві T12A, розглянуто можливість нанесення нітридів, карбідів, боридів та оксидів гафнію, цирконію, молібдену, вольфраму, ітрію та нікелю. Для цього на основі спільної задачі теплопровідності та термопружності визначали обсяг зерна та глибини його залягання для розглянутих елементів, а також азоту, вуглецю, бору та кисню. Для азоту залежності обсягу зерна максимальної та мінімальної глибини залягання показані на рис. 1. Видно, що обсяг для малих енергій порядку 200 еВ відповідає нанозерну, тоді як при великих енергіях він їх перевищує (рис. 1 а), глибини залягання обсягу в першому випадку лежать в діапазоні $8,6 \cdot 10^{-10} \dots 3,9 \cdot 10^{-9}$ м – мінімальні (рис. 1, б) та $2,7 \cdot 10^{-9} \dots 6,8 \cdot 10^{-9}$ м – максимальні (рис. 1, в).

Отримання карбідів вимагає подачі іонів вуглецю, які можна отримувати безпосередньо з вуглецевого електрода при використанні магнетрону або газів, що містять вуглець.

Для вуглецю залежності обсягу зерна (рис. 2, а), мінімальної (рис. 2, б) та максимальної (рис. 2, в) глибин залягання дозволяють отримати просторову картину утворення зерна в зоні дії іона вуглецю. Видно, що нанозерно може бути отримано при енергіях іонів від 200 до 2000 еВ, тоді як поблизу 20 KeV ймовірність його утворення невисока, а зарядових числах 2 і 3 взагалі неможлива. Діапазон

мінімальних глибин залягання становить величини $1,2 \cdot 10^{-9} \dots 9,29 \cdot 10^{-8}$ м, а максимальні – $2,94 \cdot 10^{-9} \dots 1,07 \cdot 10^{-7}$ м (рис. 2). Видно, що в цьому випадку досягається максимальна глибина зони, де утворюється зерно, збільшується до десятка мікрометрів, що в останньому випадку утворює субмікрозерно.

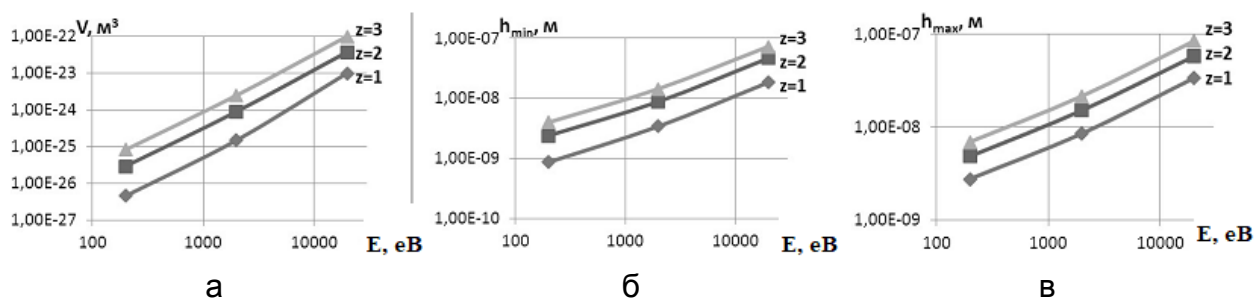


Рис. 1. Залежності обсягу нанокластера (НК) (а), мінімальної (б) та максимальної (в) глибини залягання НК при дії іонів азоту (N^+) з різним зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для T12A

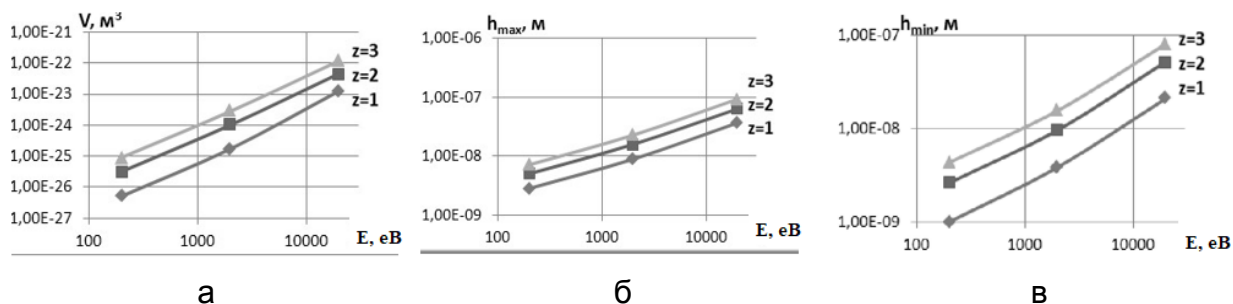


Рис. 2. Залежності обсягу нанокластера (НК) (а), мінімальної (б) та максимальної (в) глибини залягання НК при дії іонів азоту (C^+) з різним зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для T12A

Отримання карбідів вимагає подачі іонів вуглецю, які можна отримувати безпосередньо з вуглецевого електрода при використанні магнетрону або газів, що містять вуглець.

Для вуглецю залежності обсягу зерна (рис. 2, а), мінімальної (рис. 2, б) та максимальної (рис. 2, в) глибин залягання дозволяють отримати просторову картину утворення зерна в зоні дії іона вуглецю. Видно, що нанозерно може бути отримано при енергіях іонів від 200 до 2000 еВ, тоді як поблизу 20 KeV ймовірність його утворення невисока, а при зарядових числах 2 і 3 взагалі неможлива. Діапазон мінімальних глибин залягання становить величини $1,2 \cdot 10^{-9} \dots 9,29 \cdot 10^{-8}$ м, а максимальні – $2,94 \cdot 10^{-9} \dots 1,07 \cdot 10^{-7}$ м (рис. 2). Видно, що у цьому випадку досягається максимальна глибина зони, де утворюється зерно, збільшується практично до десятка мікрометрів, що у останньому випадку утворює субмікрозерно.

Для випадку дії іонів бору (рис. 3) розмір зерна збільшується: лежить у межах $4,4 \cdot 10^{-9} \dots 1,364 \cdot 10^{-7}$ м. Так, в останньому випадку ми маємо справу з субмікрозерном, глибини його залягання: мінімальна лежить у діапазоні $1,2 \cdot 10^{-9} \dots 9,29 \cdot 10^{-8}$ м, а максимальна – $2,9 \cdot 10^{-9} \dots 1,07 \cdot 10^{-7}$ м. У цьому випадку глибини залягання перевищують усі попередні, як і розмір зерна (рис. 3).

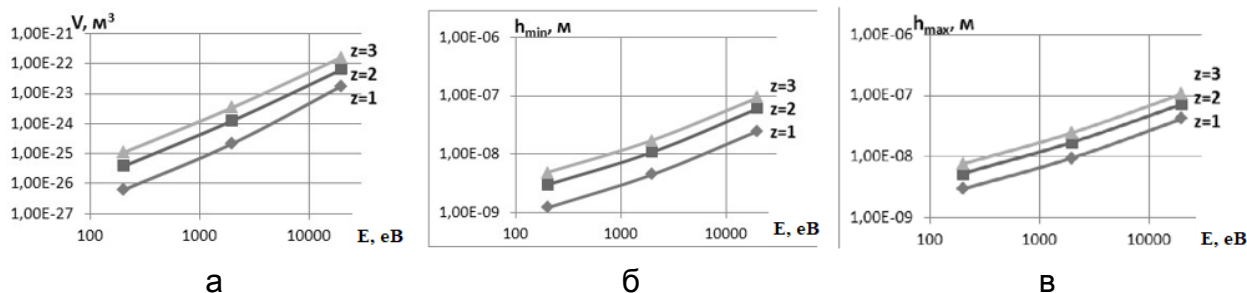


Рис. 3. Залежності обсягу нанокластера (НК) (а), мінімальної (б) та максимальної (в) глибини залягання НК при дії іонів азоту (N^+) з різним зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для T12A

Перехід до іонів кисню (для утворення оксидів) призводить до істотного зниження розміру зерна до $3,94 \cdot 10^{-9} \dots 1,04 \cdot 10^{-7}$ м, останнє значення вже відповідає субмікрозерну (рис. 4, а). Діапазон глибин залягання зерна: $7,49 \cdot 10^{-9} \dots 6,4 \cdot 10^{-8}$ м – мінімальні (рис. 4, б) і $2,65 \cdot 10^{-9} \dots 7,7 \cdot 10^{-8}$ м – максимальні (рис. 4, в) значення.

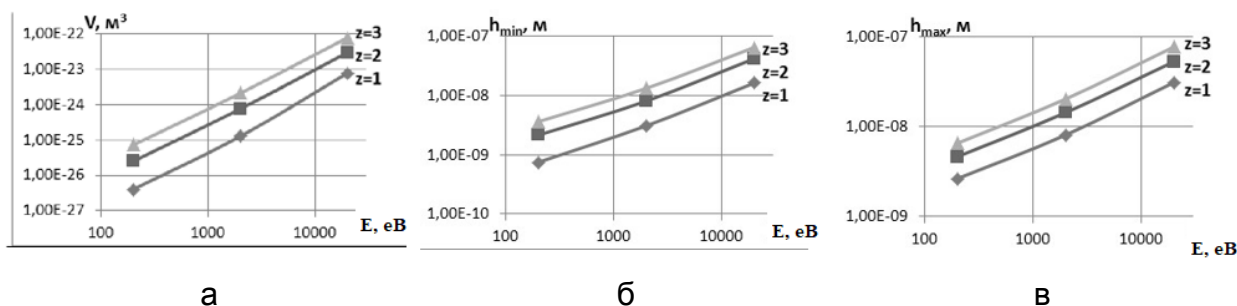


Рис. 4. Залежності обсягу нанокластера (НК) (а), мінімальної (б) та максимальної (в) глибини залягання НК при дії іонів азоту (O^+) з різним зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для T12A

Надалі в залежності від того, яку послідовність шарів ми хочемо отримати виходячи з адгезійних [2] і міцносних [3] характеристик покриття ми вибираємо поверхневий шар покриття та їх чергування. Для виконання умови високоентропійності визначаємо частку гафнію, що бере участь у процесі з урахуванням вимоги, щоб цирконію було не більше 30 %. Потім оцінюємо скважність імпульсів напруги на випарники з катодом СЦГ 20 і частку інших компонентів, для яких необхідно мати один катод двокомпонентний з співвідношенням компонентів 50%/50% і два випарники з однокомпонентними катодами (причому об'єднуючи в двокомпонентному тиску температурах). Далі розглядаємо (залежно від обраної послідовності шарів, співочий шар – зовнішній, для нього вибираємо діапазон глибин: мінімальний та максимальний, а також розмір зерна. Другим по глибині буде шар зі з'єднань, елементів або інтерметалідів) залежно від характеру роботи РІ: якщо РІ працює з ударним навантаженням, то другий шар повинен бути з чистого металу (інтерметалідний) або з'єднання, що демпфує інформацію першого шару. Наступні шари можуть бути з хімічних сполук.

На рис. 5 для іонів гафнію показані всі три залежності. Видно, що обсяг, відповідний НС, реалізується до енергії іонів близько 700 ... 800 еВ і глибини: для мінімальної 0 ... $2,2 \cdot 10^{-8}$ м; для максимальної – $1,8 \cdot 10^{-9} \dots 3,2 \cdot 10^{-8}$ м. Видно, що зі зростанням маси іона обсяги НС і глибини їх залягання істотно зменшуються. Ця

тенденція простежується для всіх розглянутих іонів. Щоб утворилися нітриди, необхідно, щоб заряд і енергія іонів азоту були такими, а глибина його залягання була близька отриманим для гафнію (пор. рис. 1 і 5).

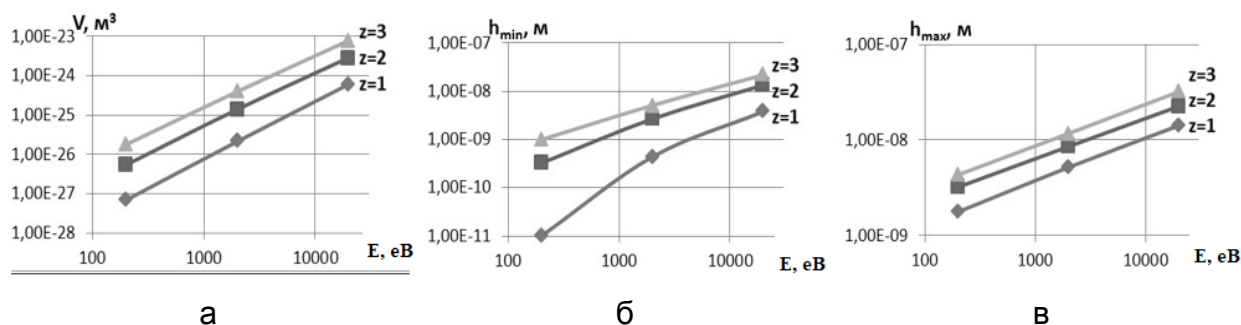


Рис. 5. Залежності обсягу нанокластера (НК) (а), мінімальної (б) та максимальної (в) глибини залягання НК при дії іонів азоту (Hf^+) з різним зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для Т12А

Перейшовши до залежностей для цирконію (Zr^+) (рис. 6), отримуємо, що для всіх досліджуваних енергій реалізуються НС. Причому за 200 еВ глибини залягання становлять: мінімальна – $0 \dots 6,3 \cdot 10^{-10}$ м; максимальна – $3,34 \cdot 10^{-9} \dots 5,43 \cdot 10^{-9}$ м. При 2000 еВ мінімальні – $6,37 \cdot 10^{-10} \dots 5,37 \cdot 10^{-9}$ м; максимальні – $5,4 \cdot 10^{-9} \dots 1,25 \cdot 10^{-8}$ м. Для 20 КеВ мінімальна глибина залягання – $4,6 \cdot 10^{-9} \dots 2,48 \cdot 10^{-8}$ м; максимальна – $1,54 \cdot 10^{-8} \dots 3,52 \cdot 10^{-8}$ м.

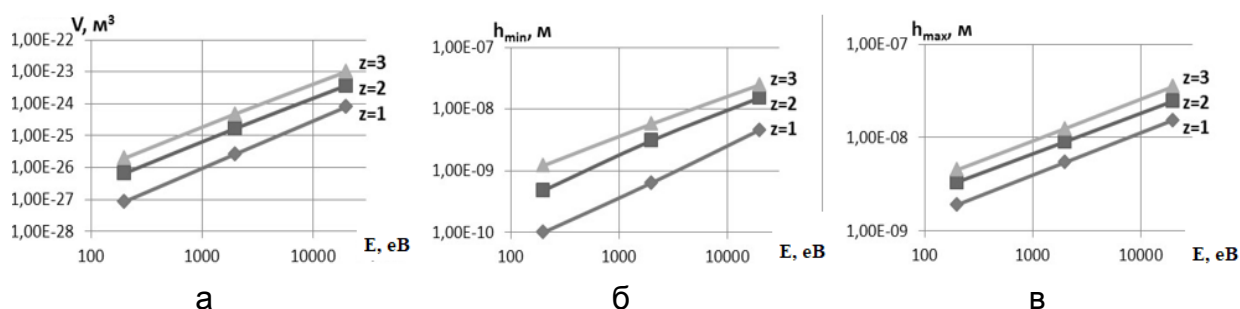


Рис. 6. Залежності обсягу нанокластера (НК) (а), мінімальної (б) та максимальної (в) глибини залягання НК при дії іонів азоту (Zr^+) з різним зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для Т12А

З порівняння глибин залягання НС для іонів гафнію і цирконію з проникненням іонів азоту бачимо, що багато енергії азоту не можуть бути використані, так як глибина їх проникнення більше, і в багатьох режимах не утворюватимуться нітриди, карбіди, бориди і оксиди, а буде досить велика кількість інтерметалідів, які мають малими фізико-механічними характеристиками, а отже, будуть зони у матеріалі зі зниженими властивостями, що не забезпечить появу високоентропійних нітридних покриттів із хорошими характеристиками.

Для молібдену (Mo^+) глибини залягання НС при енергії 200 еВ становлять: мінімальна – $0 \dots 1,18 \cdot 10^{-9}$ м, максимальна – $1,89 \cdot 10^{-9} \dots 4,49 \cdot 10^{-9}$ м. При енергії 2000 еВ : мінімальна – $6,12 \cdot 10^{-10} \dots 5,65 \cdot 10^{-9}$ м; максимальна – $5,59 \cdot 10^{-9} \dots 1,23 \cdot 10^{-8}$ м. При 20 КеВ: мінімальна – $4,47 \cdot 10^{-9} \dots 2,44 \cdot 10^{-8}$ м; максимальна – $1,52 \cdot 10^{-8} \dots 3,48 \cdot 10^{-8}$ м (рис. 7).

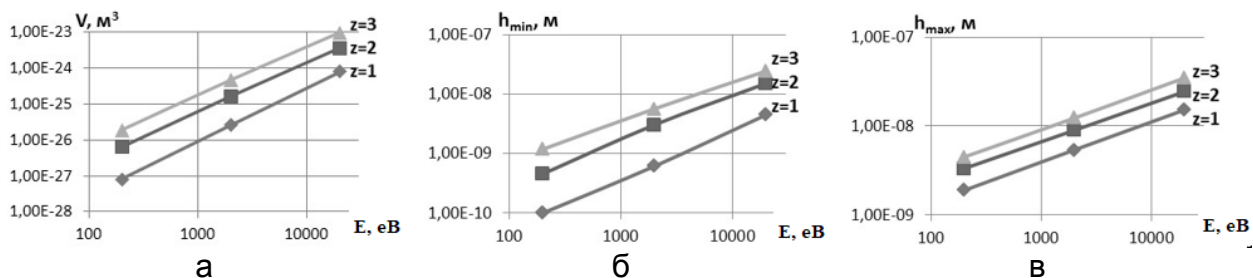


Рис. 7. Залежності обсягу нанокластера (НК) (а), мінімальної (б) та максимальної (в) глибини залягання НК при дії іонів азоту (Mo^+) з різним зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для T12A

Для іонів вольфраму (W^+) подано аналогічні графіки (рис. 8). Глибини залягання НК при енергії 200 еВ складають: мінімальна – $0 \dots 9,89 \cdot 10^{-10}$ м, максимальна – $1,77 \cdot 10^{-9} \dots 4,33 \cdot 10^{-9}$ м. При енергії 2000 еВ: мінімальна – $4,38 \cdot 10^{-10} \dots 5,1 \cdot 10^{-9}$ м; максимальна – $5,17 \cdot 10^{-9} \dots 1,17 \cdot 10^{-8}$ м. При 20 KeV: мінімальна – $3,79 \cdot 10^{-9} \dots 2,19 \cdot 10^{-8}$ м; максимальна – $1,42 \cdot 10^{-8} \dots 3,20 \cdot 10^{-8}$ м.

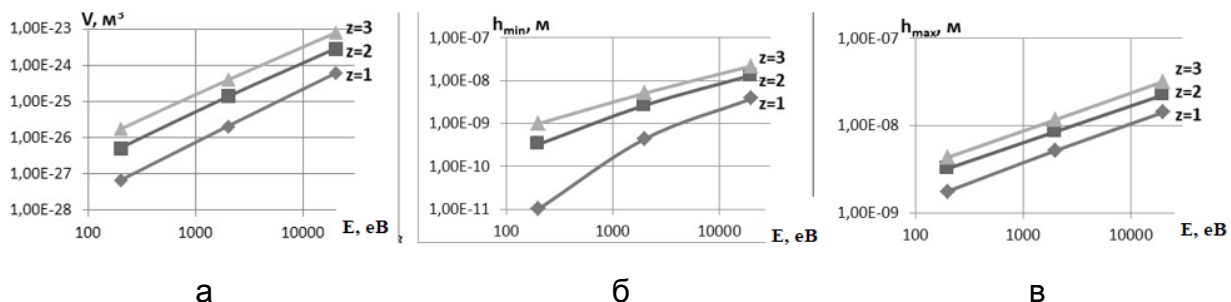


Рис. 8. Залежності обсягу нанокластера (НК) (а), мінімальної (б) та максимальної (в) глибини залягання НК при дії іонів азоту (W^+) з різним зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для T12A

Видно, що глибини залягання НК значно відрізняються від необхідних іонів азоту, і потрібно дуже акуратно вибирати енергії та заряди з метою отримання нітридів на певній глибині.

Для іонів ітрію (Y^+) аналогічні залежності показано на рис. 9. Глибини залягання СР при енергії 200 еВ становлять: мінімальна – $0 \dots 1,23 \cdot 10^{-9}$ м, максимальна – $1,92 \cdot 10^{-9} \dots 4,54 \cdot 10^{-9}$ м. При енергії 2000 еВ: мінімальна – $6,53 \cdot 10^{-10} \dots 5,79 \cdot 10^{-9}$ м; максимальна – $5,45 \cdot 10^{-9} \dots 1,25 \cdot 10^{-8}$ м. При 20 KeV: мінімальна – $4,65 \cdot 10^{-9} \dots 2,49 \cdot 10^{-8}$ м; максимальна – $1,55 \cdot 10^{-8} \dots 3,55 \cdot 10^{-8}$ м (рис. 9).

Видно, що в цьому випадку практично для всіх енергій глибини малі, виняток становить лише енергія 20 KeV, які далеко не завжди можна реалізувати в даній установці, оскільки енергія азоту набагато менша, за якої їх глибини залягання можна порівняти.

Для нікелю (Ni^+) залежності обсягу НК та мінімальної та максимальної глибини залягання показані на рис. 10. Глибини залягання СР при енергії 200 еВ складають: мінімальна – $0 \dots 1,52 \cdot 10^{-9}$ м, максимальна – $2,1 \cdot 10^{-9} \dots 4,79 \cdot 10^{-9}$ м. При енергії 2000 еВ: мінімальна – $9,24 \cdot 10^{-10} \dots 6,63 \cdot 10^{-9}$ м; максимальна – $5,77 \cdot 10^{-9} \dots 1,35 \cdot 10^{-8}$ м. При 20 KeV: мінімальна – $5,7 \cdot 10^{-9} \dots 2,87 \cdot 10^{-8}$ м; максимальна – $1,7 \cdot 10^{-8} \dots 3,95 \cdot 10^{-8}$ м.

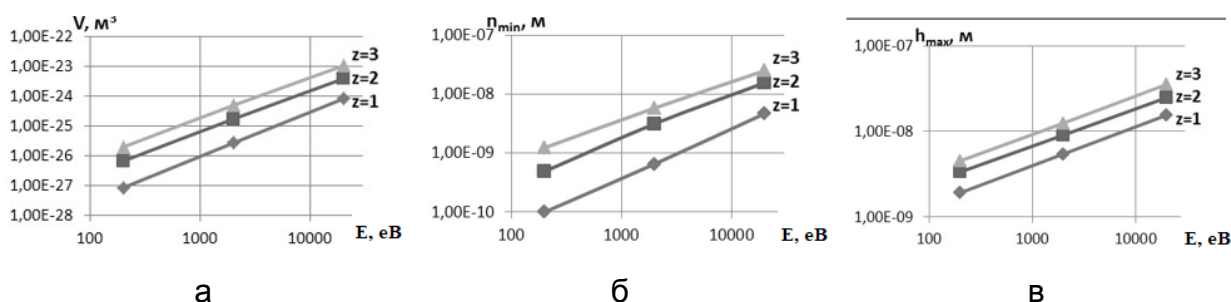


Рис. 9. Залежності обсягу НК (а), мінімальної (б) та максимальної (в) глибини залягання НК при дії іонів ітрію (Y+) з різним зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для T12A

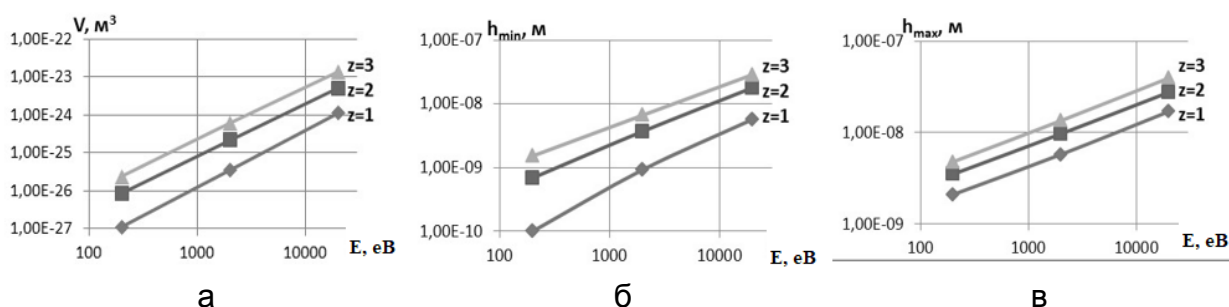


Рис. 10. Залежності обсягу нанокластера (НК) (а), мінімальної (б) та максимальної (в) глибини залягання НК при дії іонів азоту (Ni+) з різним зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для T12A

Для нікелю глибини залягання ближче до глибин залягання азоту, що сприяє ефективному утворенню НС з нітридів.

Зменшуються мінімальна та максимальна глибини залягання зерна зі збільшенням маси іона, а також незначно зменшуються обсяги зерна. Зона енергії, де можливе отримання наноструктур, збільшується, що позитивно позначається на фізико-механічних характеристиках покриття, яке при наноструктурному зерні має велику мікротвердість, межу текучості, межу міцності. Підвищується корозійна стійкість, при цьому збільшується здатність сприймати ударні навантаження внаслідок зниження модуля пружності. Це дозволяє витримувати високі навантаження в зоні пружності, тобто при великих деформаціях ми маємо невисоку напругу.

Було розглянуто можливість утворення нітридів з урахуванням просторового характеру дії іонів азоту та основних металів. Реалізувати високоентропійне покриття з шістьма металами можна в установці ВУ2-МБС, де є чотири випарники, у двох з яких будуть знаходитися катоди з чистих металів, а в решті двокомпонентні катоди. Так, наприклад, якщо один із катодів буде з ЦГ20 (20%Нf+80%Zr), для того, щоб забезпечити отримання високоентропійного покриття, необхідно, щоб гафнію було 7,5 %, а цирконію 30 % – максимально можливу кількість одного компонента у високоентропійному покритті. Тоді розрахунки показують, що решта елементів повинна становити 15,6225 % як у двох однокомпонентних катодах, так і у двох компонентному катоді.

Проведені розрахунки показують, що час роботи катода з матеріалом ЦГ20 має бути вчетверо меншим, ніж час дії інших, що дозволить забезпечити необхідне співвідношення компонентів. Робота цього катода повинна бути періодичною, щоб забезпечити одержання відповідних співвідношень компонентів у високоентропійному нітридному, карбідному, боридному та оксидному покритті з мінімальною кількістю інтерметалідів та аморфної фази.

Провівши ці розрахунки, виберемо послідовність шарів: на поверхні має бути шар із з'єднання, що має мінімум адгезійної взаємодії з оброблюваним матеріалом [7]. Інші шари розташовуються з урахуванням необхідного режиму роботи PI (обробка високоміцних та загартованих сталей; характер різання – безперервний, переривчастий та ін.).

Алгоритм вибору режимів отримання високоентропійного нітридного, карбідного, боридного та оксидного покриттів буде наступним:

1. Визначивши послідовність шарів сполук за глибиною та використовуючи графіки (рис. 1–10), вибираємо енергії іонів азоту, вуглецю, бору та кисню та відповідні їм енергії іонів гафнію, цирконію, молібдену, вольфраму, ітрію та нікелю, при яких залягання будуть близькі для отримання з'єднань на потрібній глибині.

2. Оцінюємо товщини шарів для відповідних енергій та зарядового числа, наприклад, для випадку справедливості сферичної геометрії зерна (схема показана на рис. 11), для якого шляхом найпростіших геометричних перетворень отримаємо час утворення шару:

$$t_i = \frac{e}{V_i} \cdot \frac{(h_i - h_{i-1})}{j_{ef}} \quad (1)$$

де e – заряд електрону;

V_i – об'єм зерна;

h_i і h_{i-1} – координати закінчення та початку шару;

j_{ef} – ефективна щільність струму, яка дорівнює першій критичній щільності $j_{ef} = j_{кр}^I$ [12] або можливою для даної установки $j_{ef} = j_{ву}$.

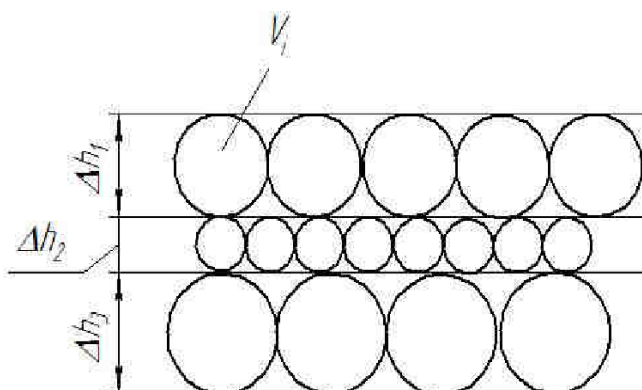


Рис. 11. Схема розташування шарів по глибині припущення сферичної геометрії зерна

У припущенні циліндричної геометрії зерна, використовуючи прості геометричні перетворення, отримуємо:

$$t_i = \frac{16 \cdot \pi \cdot e}{9 \cdot V_i^{2/3} \cdot j_{ef}} \quad (2)$$

Позначення аналогічні позначенням виразу 1.

3. Визначивши час отримання кожного з шарів, забезпечуємо в технології ці режими, надалі замикаємо ланцюг, необхідний реалізації технології: енергія іонів всіх сортів, їх заряд, необхідна щільність струму для іонів кожного сорти і час відповідного джерела іонів. Зрештою отримуємо просторово-часову картину технологічного процесу з розрахованими параметрами зерна.

Видно, що необхідно забезпечити просторово-часовий закон розподілу іонів у матеріалі деталі з метою отримання ефективних високоентропійних нітридних, карбідних, борідних та оксидних покриттів.

Висновки

В результаті спільної дії всіх розглянутих видів іонів ми можемо отримати високоентропійне покриття, а з урахуванням дії іонів азоту (вибравши відповідну енергію іонів) високоентропійне нітридне, карбідне, боридне, оксидне наноструктурне покриття.

Завдяки створенню шарів із високоентропійних нітридних, карбідних, борідних та оксидних наноструктурних покриттів і вибравши послідовність шарів (перший на поверхні з урахуванням адгезійної взаємодії з оброблюваним матеріалом), ми можемо конструювати ефективний різальний інструмент високої працездатності.

Показано, що для отримання ефективних високоентропійних покриттів необхідно шляхом керування установкою забезпечити відповідний просторово-часовий закон розподілу подачі іонів у матеріал РІ.

Запропоновано алгоритм вибору технологічних режимів отримання високоентропійного нітридного, карбідного, борідного та оксидного нанопокриття з шарами, що чергуються, з урахуванням адгезійної взаємодії поверхневого шару з оброблюваним матеріалом.

Список літератури

1. High-Entropy Alloys – A New Era of Exploitation / J. W. Yeh, Y. L. Chen, S. J. Lin, S. K. Chen // Materials Science Forum. – 2007. – Vol. 560. – P. 1–9.
2. Microstructures and properties of high-entropy alloys / Yong Zhang, Ting Ting Zuo, Zhi Tang, Michael C. Gao, Karin A. Dahmen, Peter K. Liaw, Zhao Ping Lu. – 2014. – P. 1–93.
3. Ивченко, М. В. Високоентропійні еквіатомні сплави AlCrFeCoNiCu: гіпотези і експериментальні факти / М. В. Ивченко, В. Г. Пушкин, N. Wanderka // Журнал технічної фізики. – 2014. – Т. 84, вип. 2. – С.57–64.
4. Фазовый состав и свойства износостойких Ti-Al-Cr-Zr-Nb-N покрытий, полученных методом физического осаждения из газовой фазы / И. В. Блинков, А. О. Волхонский, В. Н. Аникин и др. // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – Т. 37.– С. 37–44.

5. Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов и нитридных покрытий на их основе / А. Д. Погребняк, А. А. Багдасарян, И. В. Якущенко, В. М. Береснев // Успехи химии. – 2014. – № 83 (11). – С.1027–1061.

6. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокрытиями и наноструктурными модифицированными слоями : моногр.-справ. : в 2 кн. / Г. И. Костюк. – Х. : «Планета-Принт», 2016. – Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. – 735 с.

7. Костюк, Г. И. Эффективные покрытия и модифицированные упрочненные слои на режущих инструментах : моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – К. : Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 728 с.

8. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур : моногр. / Г. И. Костюк. – К. : Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.

9. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы: моногр. / Г. И. Костюк. – К. : Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.

10. Костюк, Г. И. Наноструктуры и нанопокрытия: перспективы и реальность: учеб.пособие / Г. И. Костюк. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.

12. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем : моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.

13. Костюк, Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий : моногр. : в 2 кн. / Г. И. Костюк. – К. : АИНУ, 2002. – 1030 с.

Надійшла до редакції 16.03.2017

Научные основы создания высокоэнтропийных нитридных, карбидных, боридных и оксидных нанопокровтий на твёрдом сплаве T12A

Исследована возможность создания высокоэнтропийных нитридных, карбидных, боридных и оксидных нанопокровтий на твёрдом сплаве T12A на основе гафния, циркония, молибдена, вольфрама, иттрия и никеля. Проведено исследование получения покрытий и нитридов, карбидов, боридов и оксидов непосредственно в теле материала при энергиях ионов в диапазоне от 200 до $2 \cdot 10^4$ эВ с зарядовыми числами от 1 до 3. Получены важные характеристики: объём зерна для всех перечисленных ионов и ионов азота и глубины их залегания, что позволяет оценить слои наноструктур из соединений и элементов или субмикроструктур, которые могут быть образованы этими высокоэнтропийными покрытиями. Показано, что есть возможность избежать получения интерметаллидов благодаря высокой подвижности ионов азота, углерода, бора и кислорода.

Ключевые слова: высокоэнтропийные покрытия, субмикроструктуры, наноструктуры, твёрдый раствор, интерметаллиды, нитриды, карбиды, бориды, оксиды.

Scientific Foundations for the Creation of Highly Entropic Nitride, Carbide, Boride and Oxide Nanocoatings on Solid Alloy T12A

The possibility of creating highly entropic nitride, carbide, boride and oxide nanocoatings on a solid alloy T12A based on hafnium, zircon, molybdenum, tungsten, yttrium and nickel was investigated. An investigation was made of the production of nitride, carbide, boride and oxide coatings and nitrides, carbides, borides and oxides directly in the body of the material at ion energies in the range from 200 to $2 \cdot 10^4$ eV with charge numbers from 1 to 3. Important characteristics were obtained: the grain volume for all the ions and nitrogen, carbon, boron and oxygen ions listed and their depth, which allows us to evaluate the layers of nanostructures or submicrostructures that can be formed by these high-entropy coatings. Moreover, it is shown that it is possible to avoid the production of intermetallic compounds due to the high mobility of nitrogen ions.

Keywords: high-entropy coatings, submicrostructures, nanostructures, solid solution, intermetallic compounds, nitrides, carbides, borides and oxides.

Відомості про авторів

Костюк Геннадій Ігоревич – професор, д-р техн. наук, професор Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний університет», Харків, Україна.

Сисоєв Юрій Олександрович – с.н.с., д-р техн. наук, професор Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний університет», Харків, Україна.

Мелкозьорова Ольга Михайлівна – канд. техн. наук, старший викладач Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний університет», Харків, Україна.