

Пітак Я.М., Мрує Д.А.

НІТРИДНІ КЕРАМІЧНІ МАТЕРІАЛИ ЯК ПЕРСПЕКТИВНІ РАДІОПРОЗОРИ ПOKPИTTЯ ДЛЯ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ ТЕХНІКИ

Стаття присвячена вивченню структури, фізико-механічних властивостей та можливостей використання нітридних керамічних матеріалів у високочастотній техніці. Розглянуто основні характеристики нітридів, зокрема AlN, BN та Si₃N₄, що вирізняються високою механічною міцністю, термічною стабільністю та діелектричними властивостями. Ці характеристики роблять їх перспективними для створення радіопрозорих покриттів та антенних систем.

Кристалічна структура нітридів забезпечує їх придатність для високотемпературного застосування. Наприклад, AlN має теплопровідність 180–200 Вт/м·К та температуру плавлення близько 2150°C, BN – низьку діелектричну проникність (~4,0) та хімічну стійкість, а Si₃N₄ відзначається міцністю на згин (800 МПа) та ізоляційними властивостями.

Термічна стабільність, хімічна інертність та низькі діелектричні втрати роблять нітридні кераміки оптимальними для фазованих антен, радіопрозорих обтічників та теплових бар'єрів. Високий рівень легування (наприклад, рідкісноземельними елементами) дозволяє додатково покращити діелектричні властивості.

Ці властивості роблять нітридні матеріали перспективними для аерокосмічної та військової сфер, виробництва радіопрозорих покриттів, теплових бар'єрів та електронних пристроїв.

Ключові слова: кераміка, нітридні матеріали, радіопрозорість, фізико-механічні властивості, діелектричні властивості, теплопровідність, термічна стабільність.

Актуальність досліджень: Сучасні тенденції розвитку високочастотної техніки, зокрема у військовій, аерокосмічній та телекомунікаційній галузях, вимагають створення нових матеріалів, що поєднують високу механічну міцність, термічну стабільність та низьку діелектричну проникність. Традиційні матеріали, такі як полімери та оксиди, не завжди відповідають цим вимогам через обмеження у термічній стійкості та механічній надійності. Нітридні керамічні матеріали, зокрема AlN, BN та Si₃N₄, завдяки своїм унікальним властивостям, таким як висока температура плавлення, хімічна інертність, мала діелектрична проникність і відмінна теплопровідність, стають перспективними кандидатами для застосування в конструкціях, що працюють в умовах екстремальних навантажень. Особливо актуальним є використання нітридних керамік для створення радіопрозорих покриттів, фазованих антенних решіток, теплових бар'єрів та елементів електронних систем. Це відкриває нові можливості для підвищення ефективності сучасних високочастотних пристроїв та військових систем. Таким чином, дослідження нітридних матеріалів та їх властивостей має важливе значення для подальшого розвитку технологій, забезпечення надійності обладнання та створення нових, більш стійких і функціональних конструкцій.

Метою статті Метою статті є аналіз фізико-механічних та діелектричних властивостей нітридних керамічних матеріалів, зокрема AlN, BN та Si₃N₄, а також оцінка їхнього потенціалу для застосування у високочастотній техніці. Особливу увагу приділено вивченню термічної стабільності, хімічної інертності та низької діелектричної проникності цих матеріалів, що робить їх перспективними для створення радіопрозорих покриттів, антенних систем, теплових бар'єрів та інших елементів сучасних технологій.

У ході дослідження також розглянуто можливість підвищення експлуатаційних характеристик нітридних керамік шляхом легування та оптимізації технологій отримання, що сприяє їх ефективному використанню у військовій, аерокосмічній та електронній сферах.

Загальна характеристика радіопрозорих покриттів Матеріали з високою проникністю для військово-повітряно-космічної техніки застосовуються для захисту чутливих радіочастотних компонентів (антенних систем, радарних засобів) від негативного впливу - температури, вологості, абразивних частин та високих швидкостей повітряного потоку [1]. Основними критеріями для таких матеріалів є:

- Стійкість до високих температур (від 600°C до 800°C та вище);
- Висока міцність матеріалу та стійкість до ударних навантажень.
- Низькі електричні втрати допомагають безперешкодне проходження радіохвиль.
- Стійкість до корозії та хімічної інертності.

Традиційні матеріали (полімери, кварцове скло та оксидні кераміки) мають свою обмежену сферу застосування: полімери втрачають свою стабільність при високих температурах; кварцове скло є дещо хрупким; а оксиди кераміки часто мають підвищену діелектричну проникливість і це може призводити до втрат сигналу. Це обумовлює необхідність пошуку нових типів матеріалів, як можуть задовольнити вищезазначені вимоги.

Нітридні керамічні матеріали: огляд основних представників. Нітрид алюмінію (AlN). Цей матеріал маючи високу теплопровідність (~180–200 Вт/(м·К) при кімнатній температурі), дозволяє виводити тепло з чутливих пристроїв. При цьому низька діелектрична проникність (~8.5), забезпечуватиме максимально можливе збереження електромагнітного сигналу [4, 5]. Крім цього AlN характеризується стабільною роботою при нагріванні до 1000–1200°C - це робить його привабливим для застосування в галузях у воєнно-електронних технологіях та радіозв'язку.

Нітрид бору (BN) відомий у декількох модифікаціях. Особливо часто використовують гексагональний BN (h-BN) через його дуже низьку діелектричну проникність (~4.0) та високу термостабільність [6]. BN володіє хорошими змащувальними властивостями при підвищених температурах і хімічною стабільністю, що призводить до його застосування у космічному обладнанні як складник радіопрозорих компонентів і покриттів.

Нітрид кремнію (Si_3N_4) відзначається високою міцністю та стійкістю до ударних навантажень і може витримувати значні динамічні навантаження [7]. Це робить Si_3N_4 привабливим матеріалом для деталей під екстремальними умовами експлуатації (броня, конструкційні елементи літака), і водночас його діелектричні характеристики достатньо для застосувань у високочастотних апаратах.

Блок-схема: Багатошарове покриття



Рисунок 1 - умовна схема багатошарового покриття

На рисунку 1. представлена умовна схема багатошарового покриття: верхній шар (наприклад AlN або BN) забезпечуватиме прозорість для радіохвиль і стане тепловим бар'єром; проміжний шар налаштуватиме механічні властивості системи; а основний шар (який може бути Si_3N_4 або іншою керамікою) буде виконувати функцію опорного елемента.

Діелектричні та радіотехнічні характеристики. Одна з головних переваг нітридних матеріалів - це низька діелектрична проникність (ϵ) та малі втрати ($\tan \delta$) в мікрохвильовому діапазоні [5]. Для AlN характерне значення ϵ приблизно 8,5; для BN (гексагонального кристалу) - близько 4,0. Це визначається тим, що покриття з цих матеріалів практично не впливає на параметри проходження радіохвиль і збереження якості сигналу.

Термомеханічні властивості

- AlN: температура експлуатації до 1000–1200°C; висока теплопровідність.
- BN (h-BN): стабільність до 1500°C і вище; гарні мастильні властивості у вакуумі та космічному середовищі.
- Si_3N_4 : виняткова міцність і здатність протистояти ударним навантаженням; застосовується при температурах ~1200–1300°C [7, 8].

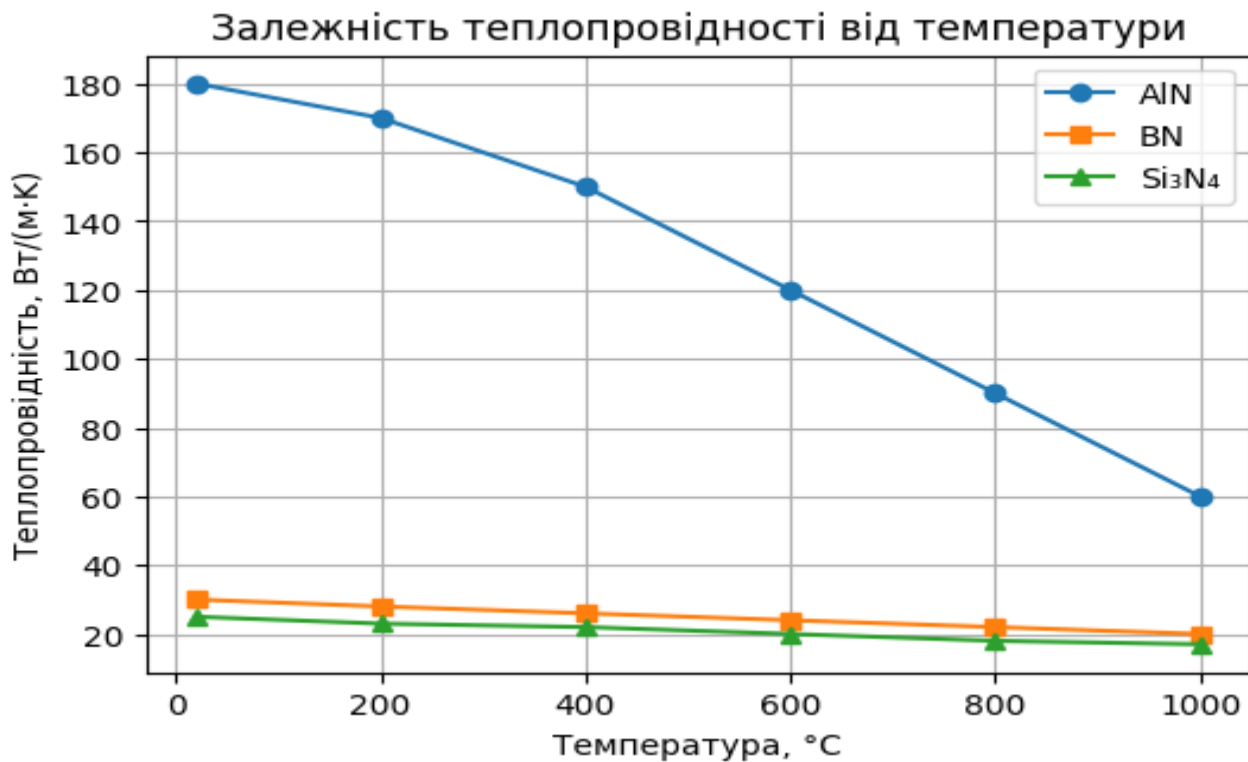


Рисунок 2 - Графіки зміни теплопровідності

На рис. 2 представлені типові графіки зміни теплопровідності (Вт/(м·К)) в залежності від температури. AlN мають найвищу значення при кімнатній температурі (~180–200 Вт/(м·К)), у той час як у BN і Si₃N₄ теплопровідність менше, але достатня для багатьох інженерних застосувань [5, 9].

Хімічна стійкість та корозійна поведінка. Всі нітридні керамічні вироби мають високу стійкість до корозійного впливу в різних агресивних середовищах: окисних, лужних та кислих. h-BN характеризується хімічною інертністю і може використовуватися у високотемпературних печах та реакторах; Si₃N₄ зберігають свою стабільність в умовах окислювальних газів. AlN може почати окислюватися при дуже великих температурах, але за правильно спланованими умовами експлуатація цього процесу є малозначним.[4, 6].

Температурна стійкість нітридних матеріалів. Однією з ключових переваг нітридних керамічних матеріалів є їх висока температура плавлення, що забезпечує стабільність при експлуатації в екстремальних умовах. Ця властивість є критично важливою для застосування у військовій та аерокосмічній техніці, де матеріали піддаються високим тепловим навантаженням, зокрема під час роботи в атмосфері з високою температурою або при русі на гіперзвукових швидкостях.

Серед нітридів найбільш відомі зразки, такі як нітрид алюмінію (AlN), нітрид бору (BN) та нітрид кремнію (Si₃N₄), демонструють стабільність за температур понад 2000°C. Наприклад, AlN має температуру плавлення близько 2150°C, а HfN — до 3310°C. Це значно перевищує температури плавлення більшості традиційних матеріалів, таких як оксиди та навіть багато карбідів.

Для порівняння температур плавлення різних сполук оксидів, карбідів і нітридів елементів представлено у таблиці 1.

Температура плавлення оксидів, карбідів та нітридів основних елементів

Елемент	Оксиди (формула)		Карбіди		Нітриди	
	Формула	t_пл (°C)	Формула	t_пл (°C)	Формула	t_пл (°C)
Бериллий	BeO	2570	Be ₂ C	2100 (розкладається)	Be ₃ N ₂	2200
Магний	MgO	2800	-	-	-	-
Алюміній	Al ₂ O ₃	2050	Al ₄ C ₃	2200 (розкладається)	AlN	2150
Кремний	SiO ₂	1713	SiC	2500	Si ₃ N ₄	2200
Кальцій	CaO	2570	CaC ₃	2300	-	-
Титан	TiO ₂	1640	TiC	2810	Ti ₂ N ₂	2930
Ванадій	VO ₂ V ₂ O ₃	1967 1970	VC -	2810 -	VN	2050
Хром	Cr ₂ O ₃	1990	-	-	-	-
Марганець	MnO	1650	-	-	-	-
Железо	Fe ₂ O ₃	1538	Fe ₃ C	1837	-	-
Цинк	ZnO	1800	-	-	-	-
Стронцій	SrO	2430	-	-	-	-
Иттрий	Y ₂ O ₃	2110	-	-	-	-
Цирконій	ZrO ₂	2700	ZrC	3800	ZrN	3000
Молибден	-	-	MoC	2570	-	-
Барій	BaO	1930	-	-	-	-
Лантан	La ₂ O ₃	2315	-	-	-	-
Церій	CeO ₂	1950	-	-	-	-
Гафній	HfO ₂	2812	HfC	4160	HfN	3310
Вольфрам	WO ₂	1500-1600	-	2857 (розкладається)	-	-
Торій	ThO ₂	3050	-	-	-	-
Уран	UO ₂	2176	U ₂ C ₃	2100	-	-

Аналіз даних таблиці демонструє, що нітридні сполуки, зокрема ZrN, HfN та AlN, мають значно вищу температуру плавлення у порівнянні з їхніми оксидними та карбідними аналогами. Наприклад, ZrO₂ плавиться при 2700°C, тоді як ZrN — при 3000°C. Це дозволяє використовувати нітридні кераміки для виготовлення захисних покриттів, що витримують високі температури, а також компонентів, що працюють в умовах теплового навантаження, таких як радіопрозорі обтічники та елементи фазованих антенних решіток. Завдяки такій термічній стійкості нітридні матеріали демонструють значно вищу довговічність і надійність у порівнянні з традиційними матеріалами, що є вирішальним фактором для їх застосування у військовій, авіаційній та космічній техніці.

МЕТОДИ ОТРИМАННЯ НІТРИДНИХ КЕРАМІК. Керамічні матеріали з нітриду виготовляються за різними технологіями, серед яких найпоширенішими є гаряче пресування, реакційне спекання та хімічне осадження з паровою фазою.

Гаряче пресування. Цей метод, який використовувався для стискання матеріалів під високим тиском та температурою з метою їх формування та обробки.

Метод передбачає створення виробу за підвищеною температурою і одночасним накладанням тиску, що дозволяють досягти наступного результату:

- практично досягаючи максимально можливої теоретичної щільності m ;
- низькою щільністю;
- підвищених характеристик механізмів.

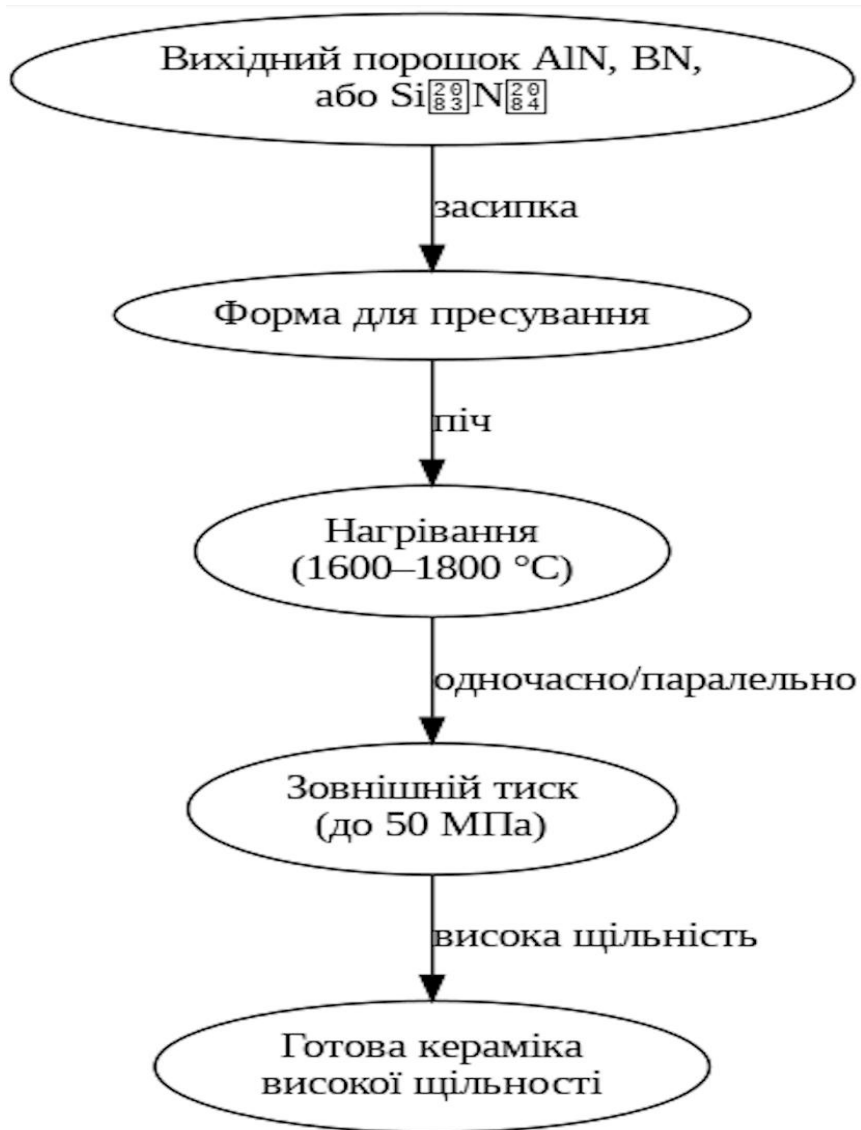


Рисунок 3 - Метод гарячого пресування

Реакційне спікання. Під час реакційного спікання початкові компоненти (наприклад, порошки кремнію і азоту для отримання Si₃N₄) взаємодіють при високих температурах і утворюють щільну кераміку з мінімальною кількістю відкритих пор. Цей метод дозволяє створити складні за формою деталі але потребує уважного контролю над атмосферою і температурним режимом [10.,11.].

Блок-схема: Процес реакційного спікання

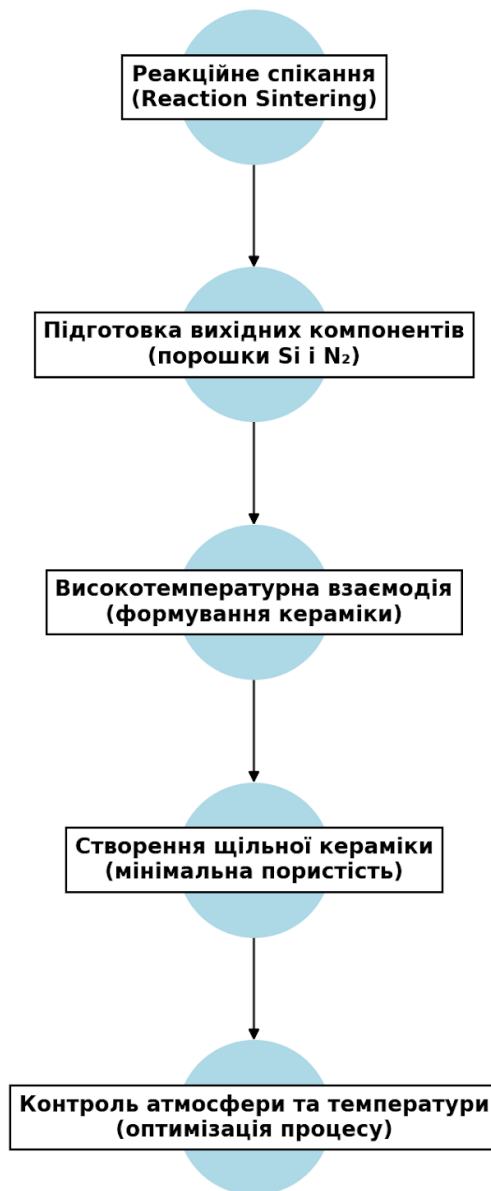


Рисунок 4- Процес реакційного спікання

Хімічне осадження з парової фази. Технологія нанесення тонких покриттів нітридів (AlN, Bn, Si_3N_4) на різноманітні підкладки (металеві та керамічні) за допомогою хімічного осадження з парової фази (CVD) дозволяють отримати наступні переваги. По-перше, це однакова товщина, по-друге - низький рівень проникливості

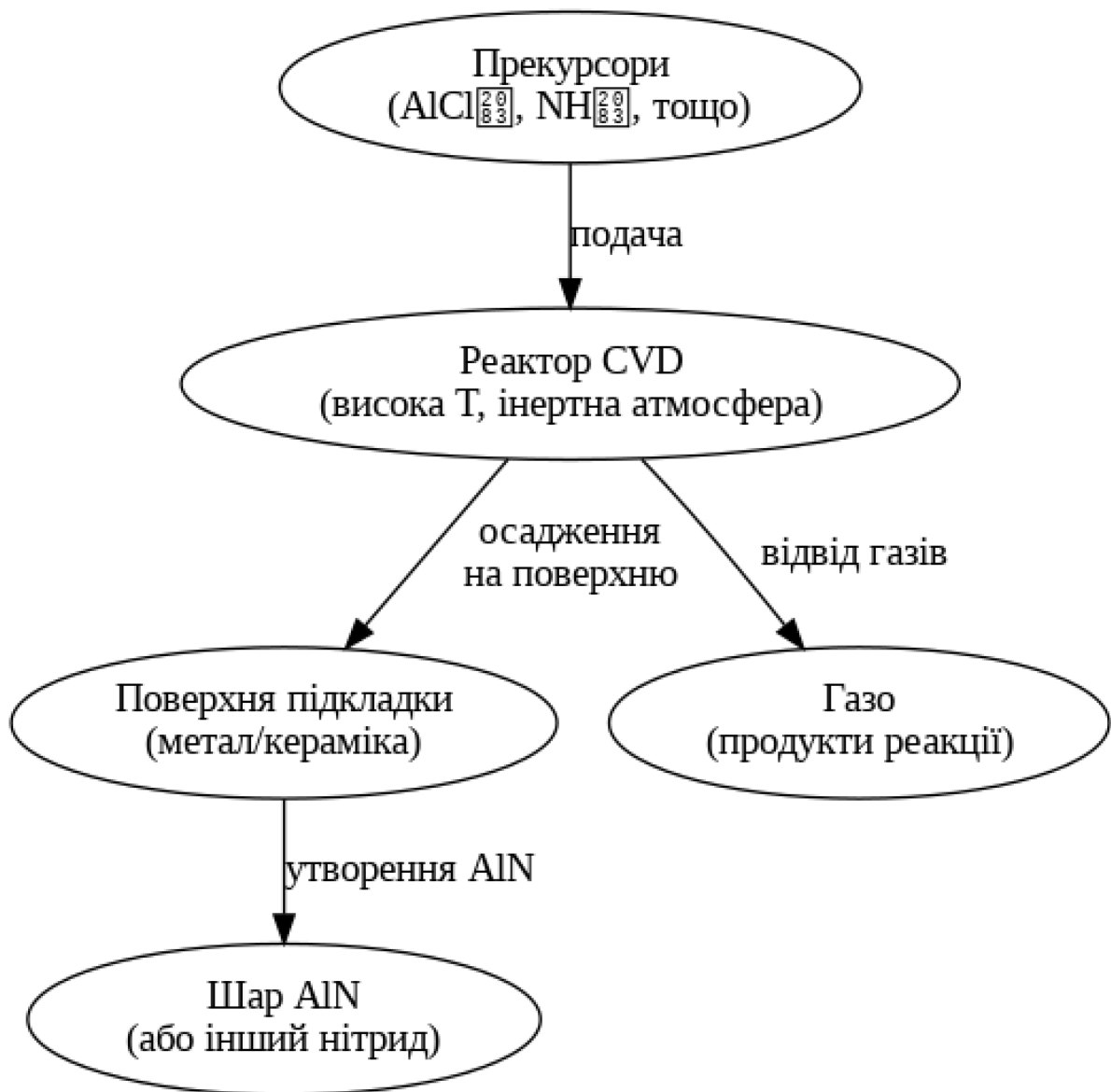


Рисунок 5- Хімічне осадження з парової фази

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ У ВІЙСЬКОВІЙ ТА АЕРОКОСМІЧНІЙ СФЕРАХ. Ракетні двигуни для швидких літальних машин. Одним з найважливіших шляхів є створення радомів для:

- винищувачі п'ятого покоління (Літак F35 та Су57),
- гіперзвукові ракети та безпілотні літальні апарати.

На таких великих швидкостях виникають надзвичайні температури і аеродинамічні навантаження. Тому прозорість для радіохвиль і термостійкість нітридних керамічних матеріалів забезпечують стабільну працездатність антени без втрати точності радара.

Фазові антени на військових суднах. У морських платформах важливо забезпечити надійну роботу радіолокаційних систем навіть при впливі корозійного середовища морською водою та змінних кліматичних умовах. Нанесення азотистих покриттів (AlN, Si₃N₄) дозволяють бути стійкими до вологості і солей і залишатися ефективними навіть у агресивному середовищі без погіршення якості передачі сигналу.

Захисні та броньові елементи. Si₃N₄ славиться своєю високою ударостійкістю та може бути використаний у захисних панелях військової техніки (броня, корпуси апаратів). Хоча основний акцент робиться на радіопрозорих властивостях, механічна міцність Si₃N₄ дозволяє посилити функціональну частину і передавати сигнали одночасно. Наприклад це можна спостерегти у корпусах радомов або комбінованих конструкціях [7, 8].

Висновки. Матеріали на основі нітридів кераміки (AlN, BN, Si₃N₄) вважаються привабливими варіантами радіопрозорих покриттів для високочастотної техніки через їхню низьку діелектричну пропускність та малі втрати у мікрохвильовому діапазоні. Вони комбінують високу термостійкість з механічною міцністю та хімічною стійкістю. Це робить їх корисними для використання у воєнних та аерокосмічних сферах (наприклад: радари і гіперзвукові літаки). Один з найпопулярніших способів отримання нітридних керамік - гаряче пресування або

реакційне спікання із застосуванням CVD. Кожен із цих методів дозволяє досягти певних характеристик продукту (щільність, товщина покриття та складність форми).

Майбутні дослідження повинні зосереджуватися на: Удосконалення технологій (наприклад поєднання CVD з плазмовими процесами та створення градієнтних структур); Зниження витрат на виробництво для широкого застосування в армійських і космічних програмах. Оптимізація діелектричних та механічних характеристик шляхом створення композитних структур або введення домішок в нітридні матеріали. Можливості використання кераміки на основі нітриду у військових цілях охоплюють не лише захисні покриття та радоми, а й броньовані деталі, складові для двигунів і теплообмінні шари для високочастотною електронною апаратурою. Це дасть можливість розглядати широкий спектр застосувань.

Література

1. Дудеров І.Г., Матвеев М.А., Суханява В.Б. Загальна технологія силікатів. – Москва: Стройиздат, 1987.
2. Балкевич В.Л. Техническая керамика. – Москва: Стройиздат, 1984.
3. Casady J. B., Johnson R. W. Status of silicon carbide (SiC) as a wide-bandgap semiconductor for high-temperature applications: A review // Solid-State Electronics, 1996. DOI: 10.1016/0038-1101(96)00045-7.
4. Chen Z. et al. Aluminum nitride: Synthesis methods, properties, and potential applications // Ceramics International, 2019. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.01.123.
5. Dresselhaus M. et al. Boron nitride nanostructures // Physical Review B, 2013. DOI: 10.1103/PhysRevB.87.245426.
6. Hampshire S. Silicon nitride ceramics – Review of structure, processing, and properties // Journal of Materials Science, 2017. DOI: 10.1007/s10853-017-0796-4.
7. Zhao M. Hot pressing techniques for advanced ceramics // Journal of the American Ceramic Society, 2021. DOI: 10.1111/jace.17875.
8. Kulkarni M. et al. Development of radomes for hypersonic vehicles: Materials and design considerations // Journal of Aerospace Engineering, 2020. DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001164

References

1. Duderov I.G., Matveev M.A., Sukhanyava V.B. General Technology of Silicates. – Moscow: Stroyizdat, 1987.
2. Balkevich V.L. Technical Ceramics. – Moscow: Stroyizdat, 1984.
3. Casady J. B., Johnson R. W. Status of silicon carbide (SiC) as a wide-bandgap semiconductor for high-temperature applications: A review // Solid-State Electronics, 1996. DOI: 10.1016/0038-1101(96)00045-7.
4. Chen Z. et al. Aluminum nitride: Synthesis methods, properties, and potential applications // Ceramics International, 2019. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.01.123.
5. Dresselhaus M. et al. Boron nitride nanostructures // Physical Review B, 2013. DOI: 10.1103/PhysRevB.87.245426.
6. Hampshire S. Silicon nitride ceramics – Review of structure, processing, and properties // Journal of Materials Science, 2017. DOI: 10.1007/s10853-017-0796-4.
7. Zhao M. Hot pressing techniques for advanced ceramics // Journal of the American Ceramic Society, 2021. DOI: 10.1111/jace.17875.
8. Kulkarni M. et al. Development of radomes for hypersonic vehicles: Materials and design considerations // Journal of Aerospace Engineering, 2020. DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001164.

This article is dedicated to the study of the structure, physical-mechanical properties, and potential applications of nitride ceramic materials in high-frequency technology. The main characteristics of nitrides, including AlN, BN, and Si₃N₄, are examined, highlighting their high mechanical strength, thermal stability, and dielectric properties. These characteristics make them promising materials for the development of radio-transparent coatings and antenna systems.

The crystalline structure of nitrides ensures their suitability for high-temperature applications. For example, AlN has a thermal conductivity of 180–200 W/m·K and a melting temperature of approximately 2150°C, BN exhibits low dielectric permittivity (~4.0) and chemical stability, while Si₃N₄ is distinguished by its flexural strength (800 MPa) and insulating properties.

Thermal stability, chemical inertness, and low dielectric losses make nitride ceramics ideal for phased-array antennas, radio-transparent radomes, and thermal barriers. A high level of doping (e.g., with rare-earth elements) further enhances their dielectric properties.

These properties make nitride materials highly promising for the aerospace and military sectors, the production of radio-transparent coatings, thermal barriers, and electronic devices.

Keywords: ceramics, nitride materials, radio transparency, physical-mechanical properties, dielectric properties, thermal conductivity, thermal stability.

Пітак Я.М. – д.т.н., професор кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Мрує Д.А. – аспірант кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»