

6. Yang S., Wu B., Gao S., et al. (2024). Protective coatings for aeroengine blade tips: a review. *Journal of Materials Science*, 59, 19424–19449.
7. Grilli M. L., Valerini D., Slobozeanu A. E., et al. (2021). Critical Raw Materials Saving by Protective Coatings under Extreme Conditions: A Review of Latest Trends in Alloys and Coatings for Aerospace Engine Applications. *Materials*. 14. 1656.
8. Bondar, I.V. & Zharovsky, G.Ya. (2025). Modernizovana ustanovka VU700 dlia napylenia bahatosharovykh pokryttiv na dovhomirni vyroby [Modernized VU700 installation for spraying multilayer coatings on long products]. *Quality, standardization, control: theory and practice*. (s. 10–12). ATM Ukraine [in Ukrainian].
9. Hasiy, O.B. (2018). Development of vacuum ion-plasma sputtering technology and directions for its improvement. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(10). 85–91.
10. Yamamura, Y. & Tawara, H. (1996). Energy dependence of ion-induced sputtering yields from monatomic solids at normal incidence. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 62(2), 149–253.

УДК 678:66.08/.09

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-436-442

**Є. О. Пащенко**, д-р техн. наук; **О. В. Лажевська**, **Д. О. Савченко**, кандидати технічних наук; **О. М. Кайдаш**, д-р техн. наук; **С. А. Кухаренко**, канд. техн. наук; **Р. М. Курганов**, аспірант; **В. М. Бичихін**, **С. В. Скороход**, **Н. В. Єльцов**

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2, м. Київ, Україна, 04074, E-mail: lab6\_1@ukr.net*

## АДАПТИВНІ АБРАЗИВНІ КОМПОЗИТИ НА ФТАЛОНІТРИЛЬНІЙ ЗВ'ЯЗЦІ

*Запропоновано підхід до синтезу композитів, здатних до адаптивної поведінки в контактній зоні за механізмом зворотної зміни густини прищеплення функціональних груп полімерного зв'язуючого до поверхні частинок наповнювача. Досліджено вплив технологічних параметрів синтезу та дії зовнішніх чинників, зокрема ультразвукових коливань, на ступінь адсорбційного прищеплення, та, відповідно, на зворотну зміну жорсткості композиту, що забезпечує ефект реакційного армування, або ж адаптацію абразивного композита в процесі його роботи. Показано переваги отриманих адаптивних композитів порівняно з традиційними за такими показниками, як продуктивність інструмента, його зносостійкість та якість оброблених поверхонь.*

**Ключові слова:** адаптивні абразивні композити, адсорбція функціональних груп, полімерне зв'язуюче, оксидний наповнювач

Адаптивна поведінка абразивного композиційного матеріалу в процесі його контактної взаємодії з оброблюваним виробом проявляється як самовільна, зворотна та багаторазова трансформація структури і властивостей поверхневого шару відповідно до умов контактної зони. Останні можуть змінюватися як у керованому режимі (наприклад, при варіюванні параметрів обробки), так і випадковим чином (зокрема, унаслідок флуктуацій миттєвих значень силових параметрів по площі контакту інструментального та оброблюваного матеріалу) [1–3].

У дослідженні як полімерне зв'язуюче для виготовлення абразивного композиційного матеріалу застосовано фталонітрильний полімер на основі мономера з циклоїмідним ароматичним ядром, модифікованим прищепленими фрагментами динітрилу ортофталевої

кислоти. Як наповнювачі використовували порошки оксидів, зокрема легкоплавкого боратного скла та оксидованих металів, а також порошки синтетичного алмазу, кубічного нітриду бору та абразивних матеріалів.

Специфіка структури та технології синтезу адаптивних абразивних композитів зумовлена необхідністю формування напруженого шару полімеру молекулярної товщини, хімічно прищепленого до активних центрів поверхні частинок наповнювача. Аналіз поведінки адсорбційно-активних центрів різної природи на поверхні порошоків оксидів чи оксидованих металів засвідчив, що оптимальне співвідношення між енергією зв'язку прищеплених полімерних фрагментів із поверхнею та енергією, необхідною для динамічної перебудови системи таких зв'язків в умовах абразивного різання, досягається у випадку, коли активні центри представлені кисневими вакансіями, утвореними в результаті термічної обробки порошку наповнювача у вакуумі. Технологічна схема отримання композитів наведена на рис. 1.

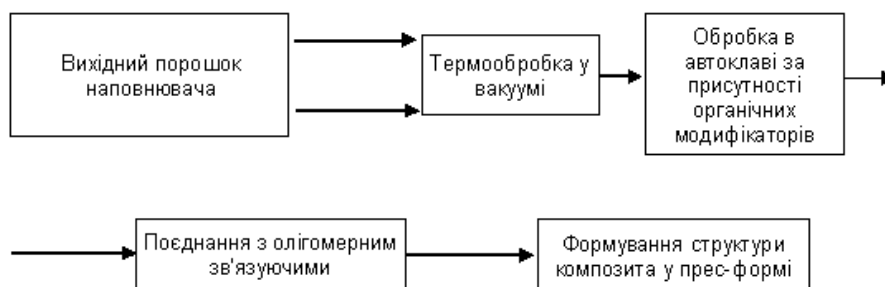


Рис. 1. Технологічна схема виготовлення композитів, здатних до адаптивної поведінки в контактній зоні за механізмом зворотної зміни густини прищеплення функціональних груп полімерного зв'язуючого до поверхні частинок наповнювача

Експериментально встановлено, що введення додаткової енергії в матеріал, наприклад шляхом дії ультразвукових коливань з частотою 40 кГц зі змінною потужністю, підсилює адсорбційну взаємодію полімеру з поверхнею наповнювача до певного критичного порога потужності, який відрізняється для різних наповнювачів та концентрацій органічного модифікатора. Після досягнення максимального приросту жорсткості, характерного для конкретного складу композита, модуль пружності матеріалу починає знижуватися за подальшого підвищення потужності ультразвукового впливу. Оцінювання зміни модуля пружності здійснювали за швидкістю поширення коливань безпосередньо в процесі ультразвукової обробки з програмованим підвищенням її потужності.

Концентрація органічного модифікатора на поверхні порошку наповнювача впливає на ступінь адсорбційного прищеплення функціональних груп полімеру до поверхні частинок наповнювача. Збільшення цього прищеплення зі зміною зовнішніх умов забезпечує ефект реакційного армування або ж адаптацію абразивного композита в процесі його роботи. Перемикання функціональних груп у стан, що відповідає більшій енергії взаємодії отвердженого зв'язуючого з поверхнею наповнювача, призводить до підвищення жорсткості композита. При цьому нижньою межею об'єму композиційного матеріалу, на який гарантовано пошириться таке підвищення жорсткості, буде характерний об'єм частинки наповнювача. Чим більшою є задана поверхнева густина перемикальних елементів, тим

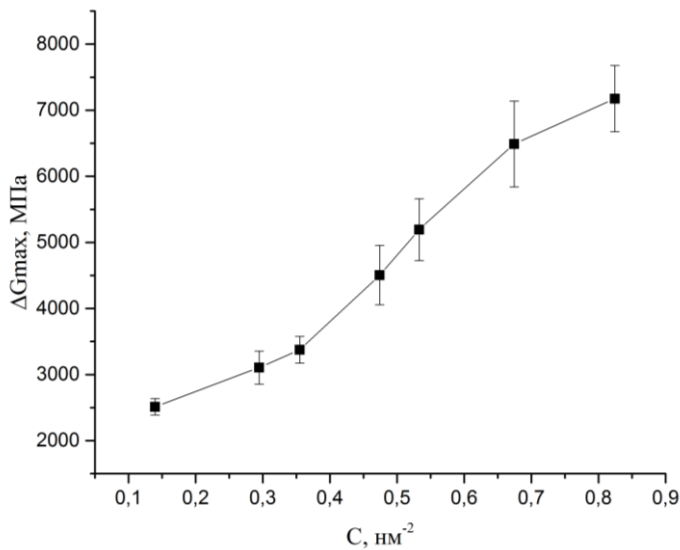


Рис. 2. Залежність максимального приросту жорсткості композита в процесі адаптації від густини прищеплених до поверхні наповнювача модифікуючих функціональних груп на межі поділу наповнювач–зв'язуюче

конкуруючих процесів. Перший полягає в тому, що при внесенні додаткової енергії в систему, здатну до адаптивної поведінки, у шарах зв'язки, що прилягають до поверхні частинок наповнювача, збільшується кількість функціональних груп полімеру, здатних подолати потенційний бар'єр, який перешкоджає міцному адсорбційному зв'язуванню.

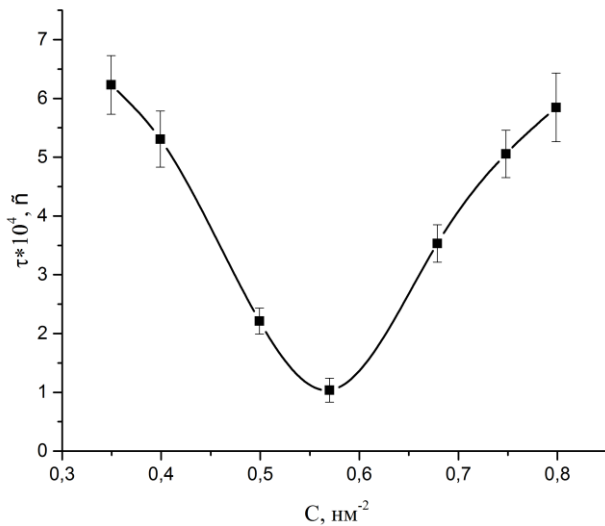


Рис. 3. Залежність часу перемикання адсорбованих функціональних груп полімеру від їх густини на поверхні розділу наповнювач–зв'язуюче

характеристика композитів, що визначає їхню здатність до самоадаптації, – це час перемикання елементів молекулярного реле. На рівні окремого елемента ця величина

більшою буде пікова величина приросту жорсткості, якої можна досягти для даного композита (рис. 2).

Зміна модуля пружності композитного матеріалу за описаних умов носила зворотний характер. Зокрема, приріст жорсткості у наших експериментах залежав від потужності ультразвукового впливу. За певного рівня потужності, кількісне визначення якого у рамках модельного експерименту не має критичного значення, спостерігався приріст швидкості поширення ультразвуку в зразку. Подальше збільшення інтенсивності впливу призводило до зниження цього показника.

На молекулярному рівні таку поведінку можна розглядати як результат взаємодії двох результатів взаємодії двох функціональних груп полімеру, здатних подолати потенційний бар'єр, який перешкоджає міцному адсорбційному зв'язуванню. Водночас із подальшим збільшенням інтенсивності енергетичного впливу розрив існуючих зв'язків починає переважати над утворенням нових точок адсорбційного контакту. Внаслідок цього для кожної поверхневої густини попередньо прищеплених до частинок наповнювача модифікуючих функціональних груп, здатних міцно зв'язуватися з функціональними групами полімеру, існує максимальний приріст жорсткості композиту як адаптивна відповідь на змінний зовнішній вплив.

Ще одна надзвичайно важлива

визначається фізико-хімічною природою адсорбційно-активного центру поверхні наповнювача та молекули органічного модифікатора, а також структурними особливостями прошарків полімерного зв'язуючого. Водночас для ансамблю перемикаючих елементів, структурні переходи яких забезпечують зворотну зміну фізико-механічних властивостей матеріалу в макроскопічному об'ємі, важливим фактором є також густина таких елементів на поверхні розділу зв'язуючого і наповнювача (рис. 3).

Для досліджених матеріалів часовий параметр оцінювався на основі даних швидкої ІЧ-спектроскопії з часовим розділенням.

Два зазначені параметри – максимальний приріст жорсткості  $\Delta G_{max}$ , який можна досягти для даного матеріалу за зворотної перебудови його структури, та час такої перебудови  $\tau$  – визначають основну робочу характеристику цього нового типу абразивних композитів – адаптивну здатність, для оцінки якої можна запропонувати такий вираз:

$$A = \Delta G_{max} \cdot 1/\tau.$$

Досягнення більшої адаптивної здатності абразивних композитів забезпечує значне зростання продуктивності виготовленого з них інструменту. Так, при заточуванні

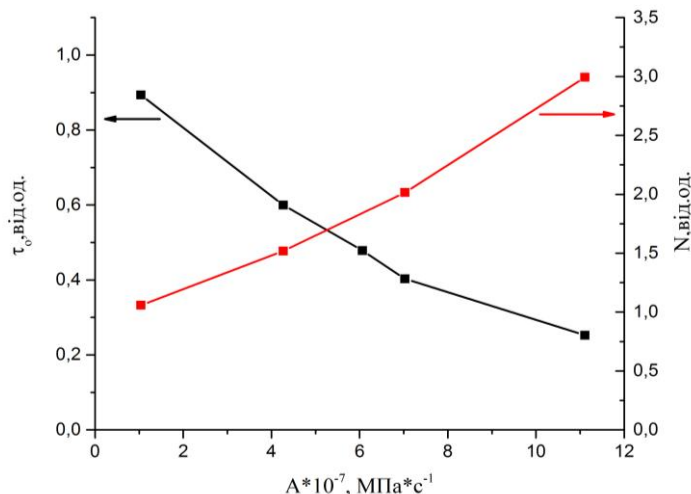


Рис. 4. Залежність оперативного часу заточування  $\tau_0$ , необхідного для досягнення оптимального радіуса заокруглення ріжучої кромки ножа, та кількості різів ( $N$ ), виконаних заточеним ножом до його затуплення, від адаптивної здатності абразивного композита ( $A$ )

паперорізальних ножів із загартованих високолегованих сталей за пружною схемою кубонітовими кругами (КР 125/100) типів 6A2 і 12A2–45 на основі адаптивних композитів спостерігався суттєвий приріст продуктивності шліфування з одночасним підвищенням зносостійкості заточених кромek ножів (рис. 4).

Шліфувальні круги типів 1A1, 11M9, 12A2–45 на основі адаптивних абразивних композитів з ефектом реакційного самозміцнення випробовувалися в умовах ГПХМЗ «ФЕД» на спеціальному шліфувальному верстаті GEMINI фірми Shneeberger (Швейцарія).

Одним із важливих показників ефективності роботи абразивних інструментів на адаптивних полімерних зв'язках є їхня здатність забезпечувати максимальну продуктивність процесу бездефектного шліфування швидкорізальної сталі (рис. 5).

Накопичений нами досвід використання абразивних композитів, здатних до адаптації в контактній зоні, свідчить про те, що вони дозволяють не лише збільшувати зняття

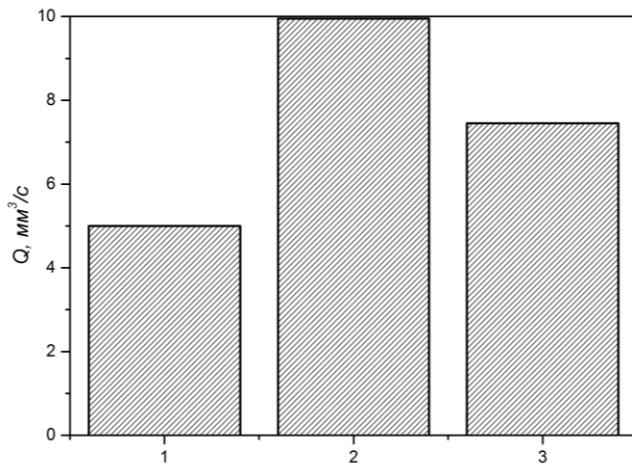


Рис. 5. Максимальна продуктивність бездефектного шліфування робочих поверхонь спеціальних фрез із сталей Р6М5: 1 – шліфувальний круг 4А2 125×10×3×20 КВ 100/80 на серійній зв'язці В2-01; 2 – шліфувальний круг 4А2 125×10×3×20 КВ 100/80 на основі адаптивного композита; 3 – шліфувальний круг 4А2 125×10×3×20 В 106 фірми Tyrolit (Австрія)

одночасним зменшенням дефектності оброблених поверхонь та зниженням зносу інструмента.

Якісна новизна роботи адаптивних інструментальних матеріалів обумовлена особливостями їх молекулярної структури, які проявляються в нетиповій поведінці в контактній зоні. Значна зміна динаміки та мікрогеометрії контактної взаємодії на рівні окремих контактних плям дозволяє отримувати практично цінні, нетипові структурні стани поверхневих шарів оброблюваних матеріалів, недосяжні при використанні традиційних абразивних композитів. Адаптивні механізми контактної поведінки полімерних систем можуть реалізовуватися з використанням різних полімерів і наповнювачів, що потребує подальших досліджень.

### Висновки

Застосування абразивних композитів на основі нового класу полімерних зв'язуючих, здатних до

оброблюваного матеріалу, але і зберігати при цьому вищу зносостійкість порівняно із серійним інструментом. Адаптивні композити поєднують підвищення продуктивності абразивної обробки з позитивним впливом на стан оброблених поверхонь, включно з їхніми мікрогеометричними параметрами та дефектністю (рис. 6).

Дефектність, зокрема, оцінювали за об'ємом мікротріщин у поверхневому шарі оброблюваного матеріалу (ВК15), визначеним методом мас-спектрометричного аналізу за допомогою молекулярного зонду.

Представлені результати свідчать про якісне підвищення ефективності абразивної обробки різних матеріалів при переході від традиційних до адаптивних абразивних композитів. Це проявляється у значному збільшенні продуктивності шліфування з

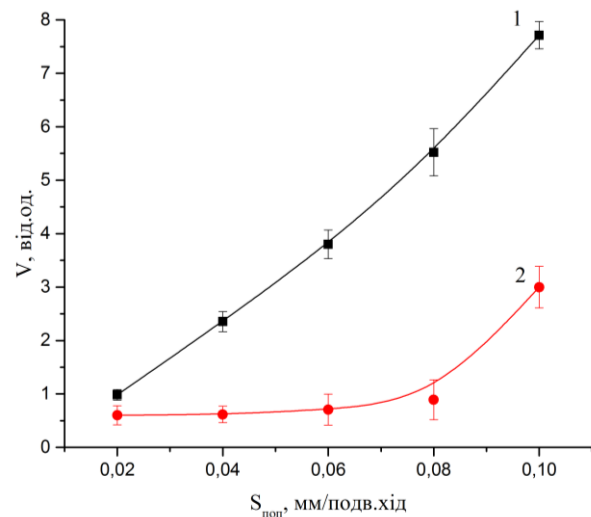


Рис. 6. Залежність об'єму мікротріщин у поверхневому шарі твердого сплаву ВК15, підданого шліфуванню кругами 12А2-45 125×5×3, АС6 100/80 100%, від величини поперечної подачі: 1 – круг на зв'язці В2-01; 2 – круг на основі адаптивного композита

адаптивної поведінки, наповнених оксидними  
440

наповнювачами, наприклад легкоплавкими боратними стеклами, з використанням як надтвердих абразивів (алмаз, кубічний нітрид бору), так і звичайних (корунд, карбід кремнію, карбід бору), забезпечує системне підвищення експлуатаційних характеристик абразивного інструмента різного призначення. У порівнянні з традиційними абразивними композитами перевага досягається за такими показниками, як продуктивність роботи інструмента, його зносостійкість та якість оброблених поверхонь.

Адаптивні абразивні композити є перспективними для різних видів абразивної обробки: шліфування, хонінгування, прецизійних фінішних операцій. Очікується, що використання інструментів на їхній основі забезпечуватиме високі результати при обробці металевих і неметалевих матеріалів різної фізико-хімічної природи.

Особливості контактної поведінки нового класу інструментальних матеріалів забезпечують високу ефективність їх використання для обробки підкладок мікросхем, оптичних елементів, високоточних деталей паливної апаратури. Закладена в самих механізмах адаптивної поведінки інструмента в контактній зоні здатність активно впливати на структуру та властивості поверхневих шарів матеріалу, що оброблюється, дозволяє розробникам і користувачам інструмента ставити завдання, які важко або взагалі неможливо виконати за допомогою традиційних абразивних композитів. Це якісне підвищення всього комплексу фізико-механічних параметрів оброблених поверхонь, отримання поверхонь із підвищеною корозійною стійкістю, формування градієнтних структур із нетиповими фізичними властивостями.

**Eu. O. Pashchenko, O. V. Lazhevskaya, D. O. Savchenko, O. M. Kaidash, S. A. Kukharenko,  
R. M. Kurganov, V. N. Bychykhin, S. V. Skorokhod, N. V. Yeltsov**

*Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine*

#### **ADAPTIVE ABRASIVE COMPOSITES BASED ON PHTHALONITRILE**

*An approach to the synthesis of composites capable of adaptive behavior in the contact zone by the mechanism of reverse change in the grafting density of functional groups of the polymer binder to the surface of filler particles is proposed. The influence of technological synthesis parameters and the action of external factors, in particular ultrasonic vibrations, on the degree of the above-mentioned adsorption grafting, and accordingly on the reverse change in the stiffness of the composite, which provides the effect of reaction reinforcement, or adaptation of the abrasive composite during its operation, have been studied. The advantages of the obtained adaptive composites compared to traditional ones in terms of tool performance, wear resistance, and parameters that determine the condition of the processed surfaces are shown.*

**Key words:** *adaptive abrasive composites, adsorption of functional groups, polymer binder, oxide filler*

#### **Література**

1. Pashchenko E. O., Savchenko D. O., Skorkhod S. V., Kurganov R. M., Klimenko S. An., Rumiantseva Yu. Yu., Kukharenko S. A., Kaidash O. M. Promising Binders of Complex Oligophenylenes Compounds with Metals for Creating Composites Based on Adaptive Hybrid-Structured Polymer Systems. *J. Superhard Mater.* 2023. Vol. 45, N 1. P. 46–53.
2. Savchenko D. A., Pashchenko E. A., Lazhevskaya O. V., Chernenko A. N., Malyshev A. V., Naidyuk E. A. Engineering of polymers with a free volume in abrasive tool composites. *J. Superhard Mater.* 2014. Vol. 36, N 3. P. 171–179.
3. Savchenko D., Pashchenko E., Kukharenko S., Kaidash O., Riabchenko S. Polymer Bulk Composites with Strong Noncovalent Interface Interactions. *Lecture Notes in Mechanical Engineering : Confer. Paper*, Odessa, September 7–10, 2021. 2021. P. 343–352.

*Надійшла 15.09.25*

## References

1. Pashchenko E. O., Savchenko D. O., Skorkhod S. V., et al. (2023). Promising Binders of Complex Oligophenylenes Compounds with Metals for Creating Composites Based on Adaptive Hybrid-Structured Polymer Systems. *J. Superhard Mater.*, 45(1), 46–53.
2. Savchenko D. A., Pashchenko E. A., Lazhevskaya O. V., et al. (2014). Engineering of polymers with a free volume in abrasive tool composites. *J. Superhard Mater.*, 3(3), 171–179.
3. Savchenko D., Pashchenko E., Kukhareno S., et al. (2021). Polymer Bulk Composites with Strong Noncovalent Interface Interactions *Lecture Notes in Mechanical Engineering : Confer. Paper*, Odessa, September 7–10, 2021. 343–352.

УДК 678:66.08/.09

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-442-448

**О. О. Ревво**, аспірант; **Є. О. Пащенко**, д-р техн. наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2,  
м. Київ, Україна, 04074, E-mail: lab6\_1@ukr.net*

## КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ КАРБАМІДО-ФОРМАЛЬДЕГІДНИХ ЗВ'ЯЗУЮЧИХ, МОДИФІКОВАНИХ ПОРОШКАМИ ОКСИДІВ

*Запропоновано новий підхід до отримання карбамідо-формальдегідних полімерів, який ґрунтується на модифікуванні вихідних смол нітрилами органічних кислот. Показано, що із збільшенням ступеня наповнення впорядкованість зростає для всіх типів досліджених наповнювачів. Вивчено структуру упорядкованих шарів у наповнених системах на основі модифікованих карбамідо-формальдегідних олігомерів та роль таких шарів у процесі отвердження. Встановлено, що введення до модифікованого зв'язуючого порошків легкоплавкого боратного скла, електрокорунду та оксиду цирконію забезпечує підвищення механічних характеристик матеріалу. Отримані результати свідчать про можливість використання таких композитів для виготовлення абразивного інструменту.*

**Ключові слова:** карбамідо-формальдегідний олігомер, модифікування (функціоналізація) поверхні, отвердження, ступінь впорядкованості

Карбамідо-формальдегідні смоли є широкодоступними в Україні, що зумовлює науковий та практичний інтерес до розроблення композиційних матеріалів на їх основі з підвищеним рівнем експлуатаційних характеристик. У вихідному стані такі смоли формують полімери з недостатніми показниками механічної міцності та хімічної стійкості. З огляду на це запропоновано новий підхід до отримання карбамідо-формальдегідних полімерів, який ґрунтується на модифікуванні вихідних смол нітрилами органічних кислот.

Мета роботи полягає у вивченні властивостей наповнених композицій на основі розроблених модифікованих карбамідо-формальдегідних олігомерів із різними наповнювачами, що можуть бути використані як зв'язуючі у виробництві абразивних матеріалів.

### Матеріали і методи досліджень

Полімери, синтезовані на основі карбамідо-формальдегідних смол із використанням доступних отверджувачів, зокрема фенолів, демонструють високу хімічну стійкість і перевищують поширені епоксидні та феноло-формальдегідні аналоги за показниками міцності на стиск, мікротвердості та модуля пружності у 1,5–2,2 рази. Для модифікації карбамідо-формальдегідних смол додавали нітрили органічних кислот. Як наповнювачі застосовувалися