

КОНСТРУКЦІЙНІ НАНОМАТЕРІАЛИ - НОВИЙ ТИП МАТЕРІАЛІВ З НАДЗВИЧАЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Олександр Добровольський¹, Тетяна Людвінська²

¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
Воздухофлотський проспект 31, Київ, Україна, e-mail: alikdobrovolskiy@ukr.net

²Інститут проблем матеріалознавства ім. Францевіча національної академії наук України,
вул. Кржижановського, 3, Київ, e-mail: ludvinska@rambler.ru

CONSTRUCTIONAL NANOMATERIALS - NEW TYPE MATERIALS WITH EXTRAORDINARY PROPERTIES

Alexander Dobrovolsky¹, Tatiana Lyudvinskaya²

¹Kyiv National University of Construction and Architecture,
Vozdukhoflotskiy Avenue 31, Kyiv, Ukraine

²Frantsevich Institute for Problems of material Science of National Academy of Sciences of Ukraine,
Krzhizhanovskogo st., 3, Kyiv, Ukraine

АНОТАЦІЯ. Описані особистості структур наноматеріалів, їхній вплив на властивості виробів, дана характеристика цих властивостей, показана сутність технологій виготовлення наноструктурних конструкційних деталей і наведено приклади застосування їх у машинобудуванні.

Ключові слова: наноматеріали, конструкційні наноматеріали, наночастинки, нанотехнології.

АННОТАЦИЯ. Описаны особенности структур наноматериалов, их влияние на свойства изделий, дана характеристика этих свойств, показана сущность технологий изготовления наноструктурных конструкционных деталей и приведены примеры применения их в машиностроении.

Ключевые слова: наноматериалы, конструкционные наноматериалы, наночастицы, нанотехнологии.

SUMMARY. Purpos. Analyzed the latest advances in research and development of modern constructional nanomaterials. **Methodology/approach.** Used the results of studies published in articles, books, and internet. **Finding.** Analyzed the structural elements that are used in the development of nanomaterials. There are ways of manufacturing of nanomaterials, as well as problems who have overcome in their implementation. Shows the effect of the structural bits and pieces on the mechanical and other properties of nanomaterials. It is noted that the nanomaterials are characterized by high values of hardness (2 ... 7 times), tensile strength and yield strength (2 ... 8 times) exhibit superplasticity effect in metals and ceramics with plasticity. The properties of nanomaterials and created their primenienie. **Reserch limitations/implication.** The use of nanomaterials in structural engineering will create a machine with a smaller mass and offer large operational reliability. **Originality/value.** Creation of structural nanomaterials is the most demanded, but less-studied region of the structural material Science. Development new nanotechnology engineering of nanomaterials is an important task modern engineering.

Key words: nanomaterials, constructional nanomaterials, nanotechnology, nanoparticles

Подано 29.01.2013; прийнято 13.05.2013

ВСТУП

За останні два десятиріччя в науці сформувався новий напрямок, пов'язаний з отриманням та використанням речовин в наностані. Цей напрямок - "Наночастки, нано матеріали, нанотехнології, нанопристрої" - став одним з найбільш пріоритетних в науці і техніці. Йому приділяють значну увагу USA, Німеччина, Японія, Росія і т.д. і менш значну – Україна. За оцінками американських експертів, обсяг продукції, в якій ключову роль відіграють наноматеріали і нанотехнології, до 2015 року досягне 1 трильйона доларів USA.

Відомо, що "нано" – це приставка, яка показує, що вихідна величина повинна бути

зменшена в мільярд разів, а коли мова йде про наноматеріали, треба звертати увагу на лінійні розміри, а саме - 1 нанометр – це мільярдна частина метра (1 нм = 10⁻⁹ м). Отже *наноматеріали* – це метали, неметали, сталі, сплави, кераміка, композиційні матеріали і т.п., у яких структурні елементи (фази) хоча б в одному вимірі мають розмір менший ніж за 100 нм. В той же час відомо, що майже у всіх сучасних конструкційних матеріалів структурні елементи (фази) значно перевищують нанорозміри. Використання таких матеріалів звичайно обмежується тим, що підвищення міцності приводить до зниження пластичності. Дослідження довели, що зменшення структурних

елементів до рівня нанорозмірів дозволяє створювати матеріали нового типу, які поєднують міцність і пластичність. Така закономірність стосується не тільки металевих матеріалів, а і композитів і, навіть, кераміки. Крім механічних характеристик у наноматеріалів у разі покращуються корозійна стійкість, зносостійкість та інші суттєві властивості.

МЕТА СТАТТІ

В роботі поставлена задача розкрити особистості структур наноматеріалів, їхній вплив на властивості виробів, а також дати характеристику цих властивостей, показати сутність технології виготовлення наноструктурних деталей і навести приклади застосування їх у машинобудуванні.

ВИКЛАД МАТЕРІАЛУ

Структура наноматеріалів. Структурними елементами наноматеріалів можуть бути частинки порошоків різної форми; волокна; дроти; плівки, які є достатньо нескладні фазові складові. Але можуть бути структурні наноелементи інших більш складних форм. Наприклад, більш складними є структурні елементи вуглецю, що зображені на рис. 1. Це, нанокон, нанохорн, нанотрубки, графен, фулерен. Фулерени також мають називу фулеріти. Фулерени - це стійкі багатоатомні кластери вуглецю з числом атомів: 32, 44, 50, 58, 60, 70 і більше. Форма фулеренів – порожнистий сфероїд, грані якого утворюють п'яти- і шестикут-

ники. Найчастіше використовують фулерен C60, де 60 – число атомів вуглецю(рис. 1,д)

До теперішнього часу визначено велику кількість різних вуглецевих нанооб'єктів з фантастичною (в прямому сенсі цього слова) різноманітністю структур і властивостей. Наприклад, характерними властивостями геометрії нанотрубок є рекордні значення питомої поверхні (в середньому $\approx 1600 \text{ м}^2 / \text{г}$ для одностінних трубок) і відношення довжини до діаметра (100000 і вище). Великі значення питомої поверхні характерні також для інших меншскладних наноструктурних елементів, таких як частинки порошоків різної форми, волокна, дроти, плівки тощо. Великі розміри питомої поверхні мають значний вплив на механічні властивості наноматеріалів.

Класифікація наноматеріалів. За аналогією з класифікацією зміцнювачів композиційних матеріалів наноеlementи можна розділити на три групи: нульвимірні, одновимірні й двовимірні. До нульвимірних наноеlementів відносяться наночастинки, нанозерна, нанокластери і інше, що мають у тривимірах нанорозміри. Одновимірні елементи – це нановолокна, нанодроти та інше з нанометровими розмірами у двох напрямках в перерізі та значним розміром в третьому вимірі, тобто за довжиною. Двовимірними елементами є наноплівки, в тому числі, у вигляді нанопокртіт з товщиною нанометрового розміру.

Виготовлення наноматеріалів. До тепе-

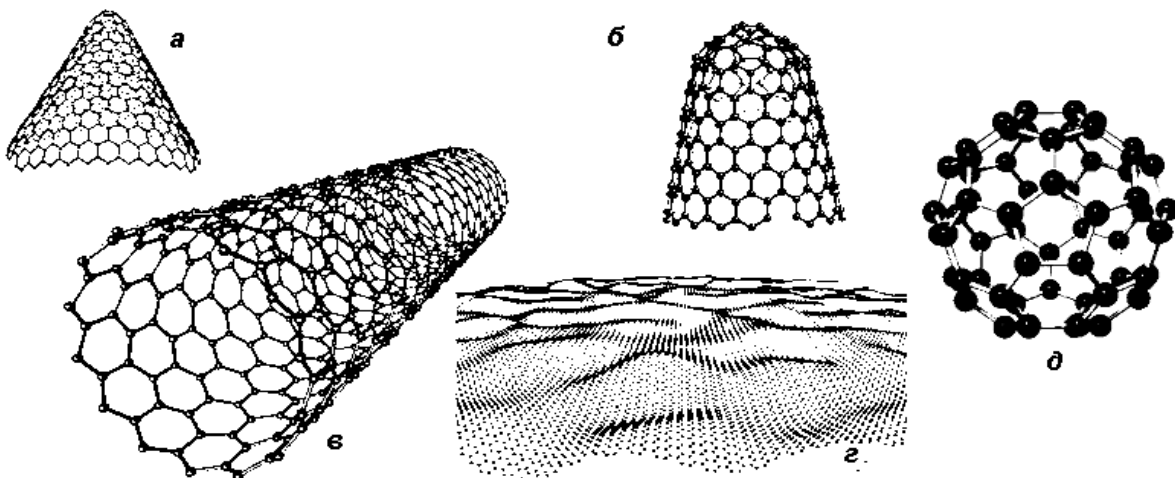


Рис. 1. Наноструктури вуглецю: а - нанокон, б - нанохорн, в - нанотрубка, г - графен, д - фулерен

Fig. 1. Carbon Nanostructures: a - nanokon, б - nanohorn in-nanotube, г - graph, д - fullerene

рішнього часу розроблено ряд способів виготовлення наноматеріалів, основними з яких є наступні:

- 1) компактування нанопорошків;
- 2) кристалізація аморфних сплавів;
- 3) пластична деформація;
- 4) осадження на підкладку.

Компактування нанопорошків є найбільш універсальним способом для створення нанокристалічної структури в різноманітних матеріалах. Він включає: отримання нанопорошків (нанооб'єктів), формування заготовок та спікання.

Існує велика кількість способів отримання нанопорошків. Деякі засновані на подрібненні, інші – фізико-хімічні – на вирощуванні із парового або рідкого стану. Загальна проблема виробництва пов'язана з високою реакційною здатністю нанопорошків. Процес повинен здійснюватися в умовах, що виключають окислення матеріалів. Він полягає в тому, що отримання порошку і компактування здійснюється в захищеному середовищі. Мета наступних операцій – отримати матеріал в консолідованому об'ємному вигляді при збереженні наноструктурного стану. Методи консолідації нанопорошків: пресування, екструзія, спікання під тиском та інші.

Наноматеріали, отримані кристалізацією аморфних сплавів. Аморфний стан досягається шляхом охолодження розплаву з надвисокими швидкостями понад 106 °C / с. Отримання наноматеріалу в такому разі може здійснюватися двома способами: в процесі охолодження або шляхом відпалу аморфізованої стрічки. Створення наноеlementів в розглянутих випадках проходить за механізмом зростання зародків з аморфної фази. Отриманий матеріал відносять до класу нанокомпозитів, тому що його наноеlementи когерентно пов'язані з аморфною матрицею. До теперішнього часу синтезовано значна кількість нанокомпозитів різного хімію (у 2...7 разів), межею міцності (у 1,5...8 разів), межею плинності (у 2...3 рази), проявляють ефект надпластичності у металів і пластичності у кераміки і т.д. Порошковометалургійними способами були отримані нанопорошки з яких були виготовлені такі наноматеріали: металеві: Fe, Ni,

мічного складу у вигляді стрічок. Вони мають високі механічні властивості і тому їх можна розглядати як конструкційні наноматеріали.

Наноматеріали, здобуті пластичною деформацією. Подрібнення зерен до нанорозмірного рівня можливо за рахунок великих деформацій полікристалічних матеріалів. Ці деформації можуть бути отримані різними способами. Сутність цих способів полягає в багаторазовій інтенсивній пластичній деформації зсуву за різних напрямків, що призводить до подрібнення мікрозерен на наноеlementи.

Нанопокриття, отримані осадженням матеріалу на поверхню деталей. Покриття, отримані осадженням на поверхню деталей (підкладку) мають достатню щільність і міцність. Вони можуть складатися з наноеlementів або уявляти із себе шари нанометрової товщини різнорідних матеріалів. Осадження матеріалу може проводитися з парів, плазми і розчинів.

Властивості наноматеріалів. При зменшенні структурних елементів, починаючи з певного порога, властивості наноматеріалів кардинально змінюються. Суттєвій зміні можуть підлягати навіть такі характеристики матеріалів, які звичайно залишаються незмінними і постійними, наприклад, температура плавлення. Вона може знижуватись при зменшенні наноеlementів не на десятки, а на сотні градусів. Прикладом цього явища може бути залежність температури плавлення золота від розмірів його наночастинок, що подано на рис. 2. Треба відмітити, що істотне зниження температури плавлення золота починається за розмірами зерен менших, за 15...20 нм. Аналогічне зниження температури плавлення зі зменшенням розмірів наноеlementів притаманне для всіх наноматеріалів.

Порівняно з традиційними наноматеріалами характеризуються підвищеними твердіс Co, Cu, Fe-Cu, W - (NiFeCo) та інші; керамічні: Al₂O₃, ZrO₂, TiO₂, та інші; кермети: Ni-Al₂O₃, (Cu-Ni)-Fe₂O₄ та тверді сплави на основі W-Co, TiC-Mo-Ni для виробництва ріжучих інструментів з підвищеною зносостійкістю і ударною в'язкістю. Створені також наноструктурні захисні термо- і коро-

зійностійкі покриття, а також полімерні композити з наповнювачами з наночасток і нанотрубок, які мають підвищені міцність і низьку займистість.

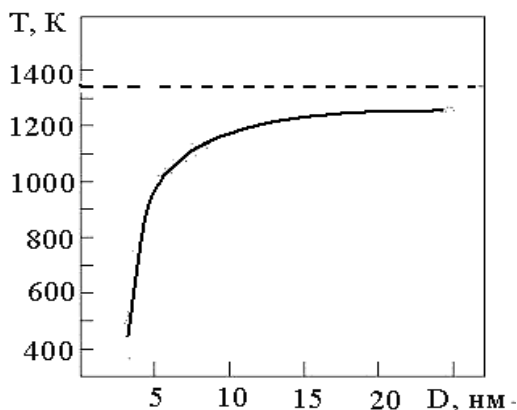


Рис. 2. Залежність температури плавлення від діаметра (D) наночастинки золота. Суцільна лінія - експериментальні значення температури плавлення нанозразка, пунктир - температура плавлення макроскопічного зразка [2].

Fig. 2. The dependence of the melting point of the diameter (D) gold nanoparticles. The solid line - experimental values of melting nano sample, dotted line - the melting point of a macroscopic sample [2]

Загальновідомо, що традиційна кераміка характеризується високою крихкістю. Експериментально підтверджено, що щільна наноструктурна кераміка має підвищену пластичність за порівняно невисоких температур.

Застосування наноматеріалів. Основними областями застосування нанотехнологій стануть електроніка, медицина, фармацевтика, екологія, хімічна промисловість, машинобудування, транспорт, системи безпеки. Передбачається, що до середини XXI сторіччя нанотехнології будуть застосовуватися в усіх сферах діяльності людини.

Приклади застосування: У КМ «Прометей» (Росія) розроблені матеріали, які в 2-10 разів перевищують такі ж самі характеристики, що мають сучасні традиційні матеріали. Розроблені спеціальні сталі, в яких вуглець замінений азотом [4]. Така заміна забезпечує унікальне поєднання властивостей: міцності, пластичності, корозійної стійкості. В майбутньому ці сталі знайдуть застосування практично у всіх галузях промисловості. Термін служби виробів з

цих сталей не обмежений. Не доведеться міняти теплові мережі, системи водопостачання, без додаткового очищення буде забезпечена висока якість води. До таких сталей, наприклад, відносяться хладостійкі азотисті сталі для роботи в суворих умовах Арктики. Завдяки яким вже вирішуються і будуть вирішені проблеми видобутку, розвідки і транспортування нафти і газу, в тому числі з доставкою до споживача у зрідженому стані, а також проблеми зберігання зріджених газів в циклопічних сховищах.

Значний інтерес представляють магнітні наноккомпозити. За їхньої розробці була використана відома закономірність, яка полягає в тому, що при зменшенні розміру зерен суттєво зростають магнітні властивості сталей. Виготовлені магнітні наносплави на основі Co і Fe. У цих сплавів були отримані найвищі значення початкової магнітної проникності та індукції насичення. Крім того їхні магнітні характеристики стають не чутливими до механічних деформацій, що виникають при монтажі і експлуатації конструкцій, наприклад, магнітних екранів.

У КМ «Прометей» (Росія) розроблені також зносостійкі і, одночасно, корозійностійкі наноструктуровані покриття [6, 7]. Водночас була застосована технологія надзвукового холодного газодинамічного напилення порошкових сплавів систем Al-Sn-Zn, Al-Zn-Si s Fe-Cr-Al, армованих частинками корунда. При застосуванні цієї технології скорочується час знаходження частинок матеріалу, що наноситься на основу, в газодинамічному потоці і значно знижується статична температура частинок при їхньому перенесенні. Температура частинок в польоті складає 120 °С, а швидкість їхнього перенесення – 400...500 м/с. Такі характеристики процесу сприяють утворенню міцного зносостійкого покриття.

Розроблені технології отримання високоефективних вузлів тертя різних діаметрів аж до 2,5 м з антифрикційних вуглепластиків марок УГЕТ, ФУТ-А, ФУТ-Ф з елементами сферопластиків для глибоководних апаратів. Вони призначені для роботи під тиском до 60 МПа, швидкості ковзання до 40 м/с і характеризуються розмірною стабільністю, достатньою міцністю і ударостійкі-

стю. Їхні механічні властивості трохи нижчі за властивості металів, однак на відміну від них, працездатні при застосуванні водяного і агресивного мастилу або без нього. Ресурс таких вузлів тертя підвищується у 5...10 разів, знижується вібрація, а також не забруднюється зовнішнє середовище.

Вчені Іжевська запустили у себе дрібносерійне виробництво пружин для автомобілів за технологією високотемпературної термомеханічної обробки металу, що дозволяє створювати нанорозмірні структури. Вдалося створити однорідну, дрібнозернисту (на нанорівні) структуру металу з частинками 20 ... 40 нанометрів. Пружини з такою структурою набувають властивості надміцності, довговічності.

У числі нових розробок Інституту фізики міцності і матеріалознавства (Томський науковий центр СО РАН) – фільтри для ефективного і надійного очищення води від мікробіологічних забруднень. Ці фільтри складаються з нановолокон нового електропозитивного матеріалу, який дозволяє видаляти із води віруси і бактерії, зберігаючи водночас її натуральну мінералізацію. Існують також інші приклади розробок.

ВИСНОВКИ

Наведені дані о властивостях конструкційних наноматеріалів, способах їх виготовлення розкривають перспективу застосування їх у машинобудуванні при створенні сучасних машин з меншою масою і більшою експлуатаційною надійністю. Створення конструкційних наноматеріалів наразі є однією з найбільш затребуваною, але, в той же час, найменш вивченою областю нанотехнологій. Детальне її вивчення тільки почалося і зараз йде накопичення знань про ці матеріали.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Вуль А.Я., Соколов В.И.** Исследования нанотрубок и алмазам/ Российские нанотехнологии, 2007. Т. 3, 3-4 с..
2. **Биленко Д.И.** Физические основы нанотехнологии – В кн.: Энциклопедия. Современ-

ное естествознание. Том 10. Современная технология. – М.: Изд. Дом Магистр – Пресс. 2001, 12-14 с.

3. **Быков Ю.А.** Структура и свойства конструкционных наноматериалов// "Справочник. Инженерный журнал", приложение №7 к журналу №7, Изд-во Машиностроение, 2010, 2-20 с.
4. **Калинин Г.Ю., Мушникова С.Ю., Нестерова Е.В., Фомина О.В., Харьков А.А.** // Исследования структуры и свойств высокопрочной азотистой стали 04Х20Н6Г11М2АФБ. Вопросы материаловедения, 2006. №1(45). 45-59 с.
5. **Абозин И.Ю., Бахарева В.Е., Николаев Г.И., Панфилов Н.А., Петрова Л.В.** и др. Патент РФ №2181128 МКИ С08L 63/00, Антифрикционная наполненная композиция и способ ее получения. опубл. 2002 . БИ, №10.
6. **Поляков С.А., Хазов С.П.** // Нанотехника в трибологии. Нанотехника. 2006. № 1 (5). 42-52 с.

REFERENCES

1. **Vul A.J., Sokolov V.I., 2007.** Nanocarbon research in Russia: from fullerenes to nanotubes and nanodiamonds. Russian Nanotechnologies, Vol. 3, 3-4.
2. **Bilenko D.I. 2001.** Physical basis of nanotechnology - In.: Encyclopedia. Modern science, Vol. 10, Modern technology, Moscow, House Masters-Press Ed., 12-14.
3. **Bykov Y.A., 2010.** Structure and properties of structural nanomaterials. Directory. Engineering Magazine. The application number 7, number 7 to the magazine. Masinostroenie Publ., 2-20.
4. **Kalinin, G.Y., Mushnikova S.Y., Nesterov E.V., Fomina O.V., Kharkov A.A., 2006.** Study of the structure and properties of high-strength steel nitrous 04H20N6G11M2AFB. Problems of Materials Science, no. 1 (45), 45-59.
5. **Abozin IY, Bahareva VE, Nikolaev G.I., Panfilov N.A, Petrov L.V. etc., 2002.** Anti-friction-filled composition and method of preparation. Patent Russia no. 2181128.
6. **Poles SA, Hazov S.P., 2006.** Nanotechnics in tribology. Nanotechnics, no 1 (5), 42-52.