

Я.І. Лепіх¹, О.А. Назаренко², О.А. Назаренко³

Про можливості використання акустичного поля для нанесення нанопокриттів

¹Одеський національний університет імені І.І Мечникова
вул. Дворянська, 2, м. Одеса, 65082, e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

²Одеська національна академія зв'язку ім. О. Попова

³Одеська Державна академія будівництва і архітектури

Наводяться результати досліджень метода нанесення наночарів із суспензії нанопорошку Al_2O_3 на металеву поверхню під впливом акустичного поля.

Ключові слова: технологія нанопокриття, акустичне поле, кавітація

Стаття постуила до редакції 22.01.2011; прийнята до друку 15.03.2011.

Вступ

Розвиток наноелектроніки та нанотехнологій значною мірою залежить від удосконалення існуючих і розробки нових технологічних методів формування наноструктур як в об'ємі, так і на поверхні твердого тіла [1-4].

Одним із ефективних модифікуючих поверхню твердого тіла методів являється акустичний метод, який має широке використання в різних галузях науки, техніки, медицини тощо [5-7]. Ведуться дослідження по використанню акустичного методу в технології мікроелектроніки – так званий метод ультразвукової обробки напівпровідникових структур [8], які показали значну перспективу його практичного використання.

У даній роботі наводяться результати досліджень з використання акустичного поля для нанесення нанорозмірних шарів оксидів металу на поверхню металевих підкладок.

I. Методика експерименту

Ідея методу полягає у використанні кавітаційного режиму [9] акустичного поля у суспензії тонкодисперсного нанорозмірного порошку і води.

Експериментальна установка для реалізації методу схематично представлена на рис. 1.

Вона складається з ультразвукового генератора 1, магнітострикційного перетворювача 2, хвилеводу - концентратора конічної форми 3, системи кріплення концентратора 4, що закінчувався пластинкою 5, а також кювети 6, заповненої водною суспензією 7 з нанопорошком оксиду металу (Al_2O_3). Загальний

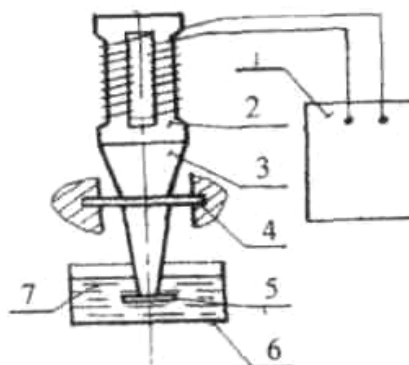


Рис. 1. Структурна схема установки для нанесення покриття на металеві поверхні акустичним методом з рідкого середовища.

вигляд експериментальної установки показано фотографією на рис. 2.

З метою створення у рідині потужного акустичного поля концентратор працював на резонансній частоті. Його довжина дорівнювала цілочисельній кількості напівхвиль $l = n \lambda / 2$ ($n = 1, 2, \dots$). При визначеній частоті довжина хвилі залежить також від форми хвилеводу-концентратора, що обумовлено дисперсією швидкості поширення акустичних хвиль у хвилеводі з перемінним перетином, який мав форму зрізаного конуса (рис. 3).

Ультразвуковий генератор працював на частоті 22 кГц, потужність становила 1,5 кВт.

Досліджувались суспензії з середнім розміром діаметра частинок порошку 50, 80 і 100 нм. Наночару оксиду металу наносилися на металеві пластинки і поверхні самих хвилеводів -

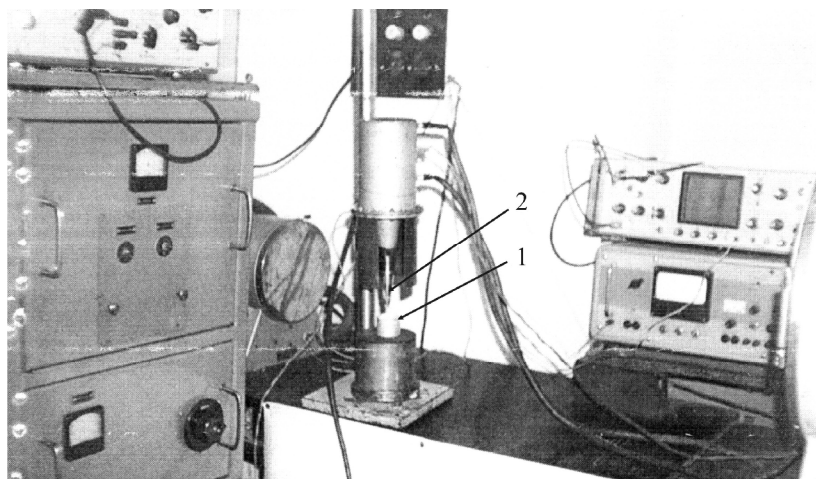


Рис. 2. Загальний вигляд експериментальної установки (1 - кювета з суспензією, 2 - хвилевід)

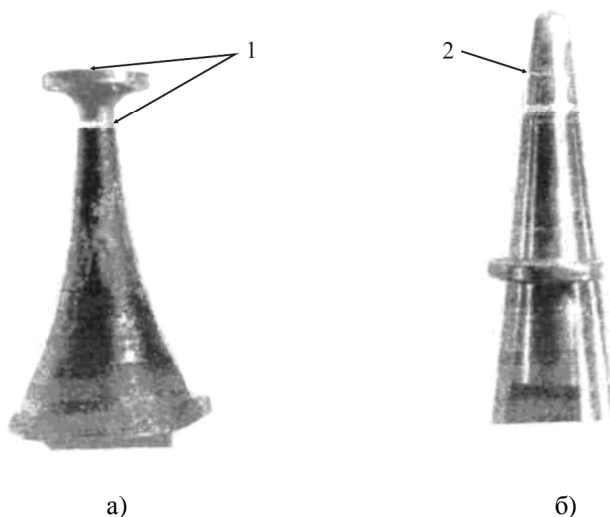


Рис. 3. Хвилеводи після напилювання (1 і 2 - напилені місця хвилеводів)

концентраторів.

Дослідження показали, що при акустичній обробці поверхні металеві пластинки 1 (рис. 3а), а також хвилеводу без пластинки 2 (рис. 3б) у рідині із суспензією порошку тривалістю 30 – 40 с на пластинці формувалася наночастинка Al_2O_3 .

Нанесені шари характеризуються високою адгезією до металевих поверхонь, однорідністю структури і рівномірністю покриття. Їх товщина пропорційно залежить від розміру наночастинок, концентрації їх у суспензії та тривалості процесу нанесення.

II. Аналіз отриманих результатів і можливих механізмів

Було встановлено, що нанесення шарів має місце при режимах кавітації. При вивченні процесу кавітаційної ерозії [9, 10] на підставі теоретичних і експериментальних досліджень були встановлені три основні механізми цього явища: вплив кумулятивних струмків, спрямованих до твердої поверхні;

швидкісний напір бульбашок (вірніше рідини, що оточує ці бульбашки), що рухаються до стінки; наявність в'язких сил рідини. Було встановлено, що при зменшенні радіуса кавітаційної бульбашки у процесі анігіляції (лусканні) в 10 разів швидкість руху його поверхні збільшується в 1000 разів і досягає приблизно 300 м/с. Швидкісний напір $P = \rho v^2 / 2$ при цьому стає рівним приблизно 108 Па. Дослідження [11, 12] показали можливість досягнення усередині кавітаційної бульбашки при її лусканні температур плазми, тобто величин порядку 107 – 108 К.

Скориставшись цими експериментально і теоретично отриманими даними, спробуємо зробити оцінку величин тисків, що виникають в умовах нашого експерименту при лусканні кавітаційних бульбашок і здійснюють силовий вплив на частинки порошку (а значить і на поверхню металу), що знаходяться у зоні поверхонь.

Для цього скористаємося експериментальними даними відповідно до таблиць [13], що встановлюють залежності питомого об'єму V і щільності ρ пари від тиску P при відповідних температурах. Швидкість

частинки порошку u визначалася з формули $u = \sqrt{2P / r}$ для діаметрів частинок рівних 50, 80 і 100 нм.

Розрахуємо тиск, що робиться частинкою порошку на поверхню пластинки, скориставшись другим законом Ньютона – $mu = F\Delta t$ і будемо виходити з того, що на частинку масою m діє сила, що надає їй швидкості u . Оскільки експеримент проводився на частоті 22 кГц, то період коливаний $T_{кол}$ дорівнював $1 / (22 \cdot 10^3)$ с. Відомо [10], що тривалість дії швидкісного напору дорівнює приблизно $0,1T_{кол}$. З врахуванням цього вираз для сили приймає вигляд $F = mu / \Delta t = 22 \cdot 10^4 H$.

Розрахунки показали, що при температурі $1 \cdot 10^3$ К для різних діаметрів частинок з боку кавітаційних бульбашок, що лускаються може бути зроблена силова дія на поверхню, на яку наноситься шар оксиду алюмінію, що забезпечують тиски, відповідно рівні $(9; 15; 19 \text{ і } 180) \cdot 10^5$ Па (при надлишковому статичному тиску 105 Па). Аналогічні розрахунки було проведено і для інших статичних тисків, включаючи $225 \cdot 10^5$ Па [12].

Вважаючи припустимим такий підхід і для більш високих температур, нами було зроблено оцінки величин тиску, що діють на частинку порошку бульбашками, що лускаються, при температурі до 104 К. Виконані розрахунки по оцінці залежності питомого об'єму V у парі води (його щільності ρ) від температури відповідно до таблиць [13] показали, що вона не добре підкоряється експонентному закону.

Це дає підстави змінити щільності пари ρ для робочого діапазону температур [13] представити у вигляді

$$\rho = \rho_0 e^{-\alpha T}, \quad (1)$$

де ρ_0 і α підлягають визначенню.

Для цього діапазон температур був розбитий на 6 інтервалів. Скориставшись виразом (1), у результаті елементарних викладень були визначені значення $\rho_0 = 5,467 \cdot 10^{-1}$ кг/м³ і $\alpha = 1,029 \cdot 10^{-3}$ (К)⁻¹. З урахуванням цього щільність ρ для певного діапазону температур описується виразом

$$\rho = 0,5467 \cdot e^{-0,00137T}, \quad (2)$$

де T – температура у градусах Кельвіна.

Розрахункова крива згідно (2) представлена на рис. 4. Точками позначені експериментальні дані, що добре укладаються в рамки розрахункової залежності $\rho(T)$. З огляду на той факт, що при лускуванні кавітаційних бульбашок виникають температури, що на кілька порядків перевищують розглянутий діапазон температур, була проведена екстраполяція отриманої кривої на більш високі температури. Це також представлено на рис. 4.

Видно, що в межах температур до 10^3 К збіг експериментальних і розрахованих залежностей цілком прийнятний. При цьому для відповідних температур (приблизно до 10^4 К) згідно (2) були розраховані щільності ρ , швидкості u руху частинок, сили F_i і тиск P , що можуть здійснювати ці частинки на поверхню пластини, розташованої на відстанях дії

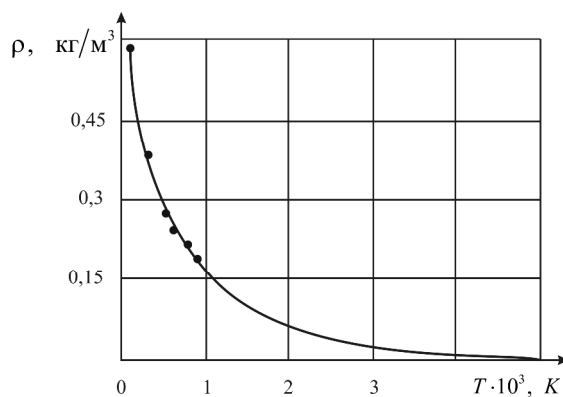


Рис. 4. Залежність щільності пари від температури

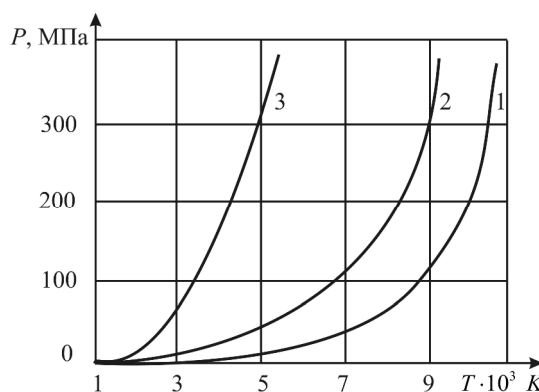


Рис. 5. Залежність тиску частинок на поверхню пластини від температури суспензії 1 – відповідає розмірам частинок 50 нм; 2 – 100 нм; 3 – 1000 нм)

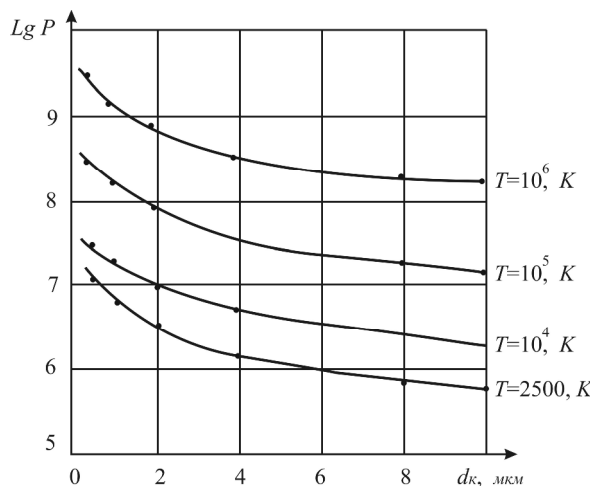


Рис. 6. Залежність тиску від діаметру кавітаційних бульбашок в результаті лускання їх при різних температурах

акустичного поля. Графічно залежності тиску часимнок на поверхню пластини від температури представлені на рис. 5.

Видно, що із зростанням температури тиск частинок на поверхню пластини збільшується. Так, якщо, відповідно до розрахунків, при температурі

$3 \cdot 10^3$ К тиск частинок з діаметром 50, 80 і 100 нм відповідно рівні $(36, 58 \text{ і } 72) \cdot 10^5$ Па, а для температури $7 \cdot 10^3$ К - $(468, 752 \text{ і } 937) \cdot 10^5$ Па, то для 10^4 К ці дані приймають значення - $(2438, 3920 \text{ і } 4890) \cdot 10^5$ Па. Усе це дає підстави вважати, що при таких тисках (і значно більших при більш високих температурах) існує імовірність проникнення наночастинок у приповерхневі шари металеві пластилини.

Поряд з відзначеними чинниками значну роль при нанесенні частинок на поверхню пластилини відіграє висока температура, що виникає при лусканні кавітаційних бульбашок. Встановлено [9], що у режимі розвинутої кавітації в 1 см^3 води протягом періоду коливань утворюється і лускаються приблизно 10^6 - 10^7 кавітаційних бульбашок. Залежність тиску від діаметра для широкого діапазону температур представлено на рис. 6.

Слід зазначити, що акустичне поле може бути використано для нанесення наночастинок покриттів у важко доступних місцях зі складною формою поверхні.

Висновки

Нанесення тонких нанорозмірних шарів на поверхні металу достатньо ефективно може бути здійснено використанням акустичного поля у режимі кавітації [15].

Пропонований спосіб нанесення нанопокриттів в умовах дії акустичного поля забезпечує їх нанесення на поверхні металів товщинами, залежними від розміру частинки порошку, концентрації наночастинок Al_2O_3 у рідкому середовищі і тривалості кавітаційного процесу.

Лепіх Я.І. – доктор фізико-математичних наук, професор, директор;
Назаренко О.А. – кандидат фізико-математичних наук, доцент;
Назаренко О.А. – кандидат фізико-математичних наук, доцент.

- [1] В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный. *Наноструктуры: физика, технология, применения*. НГТУ, Новосибирск 356 с. (2008).
- [2] Sukang Bae et al. Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes // *Nature Nanotechnology*, Published on-line: 20 June 2010.
- [3] М.В. Стріха. Фізика графену: стан і перспективи // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*, **1**(7), 3, сс. 5-13 (2010).
- [4] Я.І. Лепіх. Нобелівська премія з фізики і перспективи використання графену в сенсоріці // *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*, **2**(8) №1, сс. 5-9 (2011).
- [5] Ya.I. Lepikh, S.V. Karatsuba. Influence of ultrasound on solution hydrogen parameter // *International Congress on Ultrasonics*, Apr. 9-12, Vienna.2007., p.75 (2007).
- [6] Я.І. Лепіх. *Прикладна акустика в медицині*: Навчальний посібник.- Одеса: Астропринт, 208 с. (2005).
- [7] В.И. Петросян, Э.А. Житнева, Ю.В. Гуляев и др. Взаимодействие физических и биологических объектов с электромагнитным излучением КВЧ-диапазона // *Радиотехника и электроника*, **40**(1), сс. 311-317 (1995).
- [8] Я. Лепіх, В. Мачулін, Я. Оліх, Б. Романюк. Акустичні та акустоелектронні технології // *Вісник НАН України*, (5), сс. 3-8 (2007).
- [9] А.Д. Перник. *Проблемы кавитации*. Судостроение, Л: 368 с. (1966).
- [10] В.А. Красильников, В.В. Крилов. *Введение у фізичну акустику*. Наука, М. 400 с. (1984).
- [11] В.С. Тесленко. Ударно-акустический пробой жидкости. Кинетика вынужденного акустического рассеяния при фокусировки ударных волн // *Письма в журн. техн. физики*, **20**(5), сс.51-56 (1994).
- [12] М.А. Маргулис. Сонолюминесценция // *Успехи физических наук*, **170**(3), сс. 263-287 (2000).
- [13] М. П. Вукалович. *Технические свойства воды и водяного пара*. МАШГИЗ, М. 245 с. (1958).
- [14] И.Н. Киневский. *Концентратор ультразвука* // *Ультразвук: Малая энциклопедия*, Сов. энцикл., М. сс.169-172 (1979).
- [15] Спосіб нанесення покриття. Патент України на винахід №78652 // Золотко А.Н., Назаренко О.А., Назаренко А.Ф. та ін. Опубл. 10.04.2007. Бюл. №4, 2007.

Ya.I. Lepikh¹, O.A. Nazarenko², O.A. Nazarenko³

About an Opportunity Acoustic Field Use for Nanocoating Drawing

¹ Odessa I.I. Mechnikov National University, 2 Dvoryanskaya str. Odessa, 65082, e-mail: ndl_lepikh@onu.edu.ua

² Odessa National Academy of Communication

³ Odessa State Academy of Building and Architecture

Results of investigation of a method of drawing nanofilms from Al_2O_3 nanoporous suspension on a metal surface under influence of an acoustic field are resulted.