

PACS numbers: 42.40.Ht, 42.62.Cf, 61.41.+e, 68.37.Ps, 81.16.Nd, 82.35.-x, 83.80.-k

## Металева репліка поверхні наноструктурного темплату як інструмент «розумного» текстилю

М. Ю. Барабаш<sup>1</sup>, Н. П. Супрун<sup>2</sup>, Д. О. Гринько<sup>1</sup>, А. А. Колесніченко<sup>1</sup>,  
Д. С. Леонов<sup>1</sup>, С. О. Сперкач<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Технічний центр НАН України,  
вул. Покровська, 13,  
04070 Київ, Україна

<sup>2</sup>Київський національний університет технологій та дизайну,  
вул. Немировича-Данченка, 2,  
01011 Київ, Україна

Метою роботи є встановлення можливості використання методики тиражування поверхні наноструктурованих темплатів як інструменту «розумного» текстилю. Протестовано тиражування найпростіших наноб'єктів — 2D-наноструктур золото-аморфний молекулярний напівпровідник (АМН) литвом пластмаси під тиском з темплатних оригіналів. Завдання розробки процесу структурного фарбування текстилю за допомогою нанотехнологій у процесах наноімпринту чи крейзоутворення є актуальним. В процесі розробки були одержані зразки ґратниць площею близько 5 см<sup>2</sup> з періодом біля 700 нм за допомогою електростатичного темплату створеного у голографічній літографії в зустрічних пучках. Поверхню темплату металізували золотом за допомогою термічного випаровування у вакуумі. Репліки ґратниць одержали методами гальванопластики. Формотворні поверхні ливарних форм репліки у вигляді твердого поверхневого шару товщиною у 150 мкм вирощували зі стопу Ni-Co. Надалі нарощування репліки ніклем продовжували в іншій ванні до товщини у 2 мм.

The purpose of the work is to establish the possibility of using the technique of replicating the nanostructured-templates' surface as a tool for 'smart' textiles. The replication of the simplest nanoobjects—2D-nanostructures of gold-amorphous molecular semiconductor (AMS) by injection moulding of plastic from a template sample is tested. The task of developing the textiles' structural dyeing method using nanotechnology in the processes of nanoimprint or crazing is relevant. The developed lattice samples with an area of about 5 cm<sup>2</sup> and a period of about 700 nm are made using an electrostatic template created by holographic lithography in counter beams. The surface of the template is metallized with gold by

thermal evaporation in a vacuum. Replicas of the lattice are obtained by electroforming. The mould-forming surfaces of the casting replicas are deposited from Ni-Co alloy as a solid surface layer with thickness of 150  $\mu\text{m}$ . Subsequently, the upgrading of replica surface by nickel is continued in another bath to a thickness of 2 mm.

Цель работы — установление возможности использования методики тиражирования поверхности наноструктурированных темплатов в качестве инструмента «умного» текстиля. Протестировано тиражирование простейших нанообъектов — 2D-наноструктур золото-аморфный молекулярный полупроводник (АМН) литьём пластмассы под давлением с темплатного оригинала. Задача разработки процесса структурного окрашивания текстиля с помощью нанотехнологий в процессах наноимпринта или крейзообразования является актуальной. В процессе разработки были получены образцы решётки площадью около 5 см<sup>2</sup> с периодом около 700 нм с помощью электростатического темплата, созданного в голографической литографии во встречных пучках. Поверхность темплата металлизировали золотом с помощью термического испарения в вакууме. Реплики решётки получили методами гальванопластики. Формообразующие поверхности литьевых форм реплики в виде твёрдого поверхностного слоя толщиной 150 мкм выращивали из сплава Ni-Co. В дальнейшем наращивание реплики никелем продолжали в другой ванне до толщины 2 мм.

**Ключові слова:** темплати, наноімпринт, крейзоутворення, тиражування, аморфний молекулярний напівпровідник, полівінкарбазол, гальванопластика.

**Key words:** template, nanoimprint, crazing-decoration, replication, amorphous molecular semiconductor, polyvinylcarbazole.

**Ключевые слова:** темплаты, наноимпринт, крейзообразование, тиражирование, аморфный молекулярный полупроводник, поливинкарбазол.

*(Отримано 3 червня 2020 р.; після доопрацювання — 15 червня 2020 р.)*

## 1. ВСТУП

Вироби з нанорельєфом можуть знайти численні масові застосування в оптоелектроніці, приладобудуванні інфрачервоних і мікромеханічних пристроїв, сенсориці, оптичній і інфрачервоної спектроскопії, сонячній енергетиці й у нанотехнології текстильного виробництва [1, 2]. Для масово тиражованих нанооб'єктів істотною характеристикою є вартість при забезпеченні необхідних функціональних характеристик. Процес створення структури на поверхні текстилю під тиском є одним з ефективних способів масового тиражування. Він з успіхом також використовується у

виробництві оптичних дисків, захисних голограм, цінних паперів. Вартість об'єктів, що тиражують, визначається вартістю форми для лиття й обсягом тиражу.

При тиражуванні нанооб'єктів істотним стає урахування низки чинників [3, 4], впливом яких при виготовленні звичайних деталей машинобудування [5–8] часто нехтують або враховують спрощено.

Сучасні нанотехнології надають розробникам безліч нових метод зміни візуально сприятливого забарвлення (кольору) предметів і різноманітних поверхонь. Для цього все більше використовують «розумний» текстиль і одяг з новими ефектами, які мають принципово нові властивості та можливості у порівнянні з традиційними тканинами. «Розумні» тканини здатні фіксувати дані про стан людського організму, про навколишнє середовище, змінювати колір, світитися, трансформувати рисунок.

## 2. МАТЕРІЯЛИ ТА МЕТОДИ

Для копіювання нанорельєфу форми литвом необхідно подолати тиск під викривленою поверхнею розтопленого полімеру з радіусом кривини, що знаходиться в нанометровому діапазоні, і забезпечити перетікання в'язкого полімеру у вузьких каналах форми. Для цього доводиться використовувати тиск близько  $10^8$  Н/м<sup>2</sup>. У процесі литва під тиском відбувається об'ємна усадка полімеру в результаті ущільнення топології молекулярних ланцюгів, перебігу хемічних реакцій і теплового розширення як пластмаси, так і формотворної поверхні. Для контролю цих чинників необхідно будувати тривимірні моделі течії, розширення й усадки полімеру, які уможливають проектувати формотворну поверхню форми для литва.

Ефективною методою виготовлення формотворних поверхонь є копіювання оригіналу методою гальванопластики. Метода застосовна тільки до оригіналів із геометрією поверхні, що забезпечує рознімання деталей після нарощування металу. Ця принципова особливість враховується при конструюванні форми у вигляді особливого розташування поверхонь розніму. Проте точність копіювання поверхні методою гальванопластики ймовірно лімітується процесами дефектоутворення на міжкристалітних межах межі провідна формотворна поверхня–електроліт і може мати порядок одиниць нанометрів. Для точности копіювання важливим є спосіб виготовлення електропровідного шару на поверхні оригіналу. Істотним є й механічне внутрішнє напруження в нарощуваному металі, що приводить до деформації як оригіналу, так і формотворної поверхні при нарощуванні шару металу.

Навіть простий перелік проблем забезпечення точности при

тиражуванні нанооб'єктів литтям полімерів під тиском показує складність і багатогранність технології.

В Україні розроблено [5, 6] технологію виготовлення формотворних і прес-форм методом гальванопластики ніклем і стопом нікель–кобальт, що багато десятиліть успішно експлуатується в точному промисловому виробництві. Також в експлуатації є сучасні літійові машини із зусиллям змикання більше 200 Т. Ця технологія є і після невеликої модифікації здатна забезпечити масове тиражування нанооб'єктів.

Просту оцінку точності та рівня складності проблем, що виникають при використанні цієї технології для тиражування нанооб'єктів, може бути проведено шляхом виготовлення та безпосереднього тестування простих одновимірних періодичних структур. Певний інтерес викликають оцінка оптичних властивостей і морфології поверхні простих нанооб'єктів —  $1D$ -наноструктур золото–полімер, одержаних методом лиття пластмаси під тиском з темплатних оригіналів із наступним термічним напорошенням золота у вакуумі [9].

Оригінали ґратниць площею близько  $5 \text{ см}^2$  із періодом біля 700 нм виготовлено безпосереднім формуванням методом електростатичного темплату при голографічній експозиції в зустрічних пучках. Для металізації поверхні використовували термічне випаровування золота у вакуумі. Формотворні поверхні літійових форм виготовлено методом гальванопластики з сульфаматних електролітів. Твердий поверхневий шар формотворного деталю форми товщиною у 150 мкм вирощували зі стопу Ni–Co; потім нарощування деталю ніклем продовжували в іншій ванні до товщини у 2 мм.

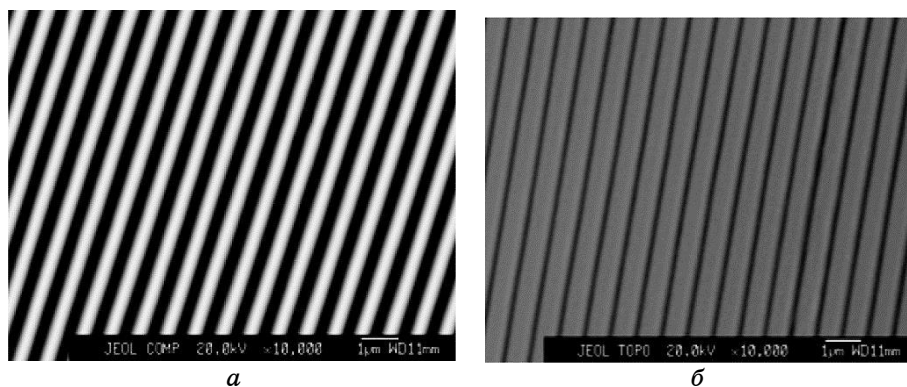


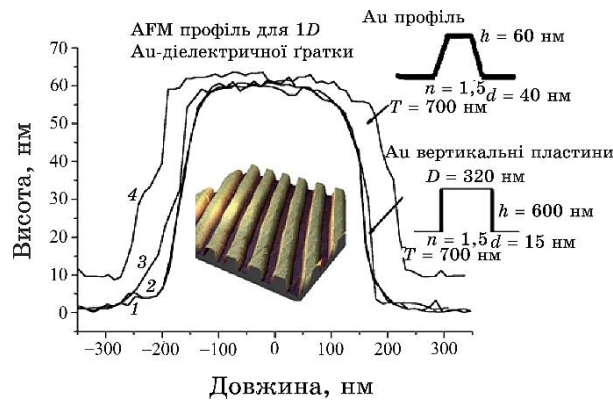
Рис. 1. Морфологія формотворної поверхні форми: *a* — зображення поверхні полімерного шару темплату; *б* — зображення металевої репліки цього темплату.<sup>1</sup>

Ґратниці тиражували литтям прозорого полікарбонату на літійовій машині DEMAG-430 (Німеччина) при зусиллі змикання у 100 Т. Для одержання метал-діелектричних структур використовували термічне випаровування та конденсацію золота у вакуумі. Для конденсації золота на бічних гранях рельєфу напорошення проводили під кутом у  $6^\circ$  до поверхні полімерної ґратниці.

Морфологію поверхні досліджували методомю сканувальної атомно-силової мікроскопії за допомогою кремнійового зонда з радіусом заокруглення у 10 нм в режимі періодичного контакту з поверхнею на приладі FemtoScan. Спектри пропускання виготовлених ґратниць реєстрували на спектрофотометрі Unicо. Морфологія поверхні та рівень дефектності формотворної поверхні (після тиражування) можуть бути оцінені із загального плану, наведеного на рис. 1. Площа дефектів складає менше 1% поверхні.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

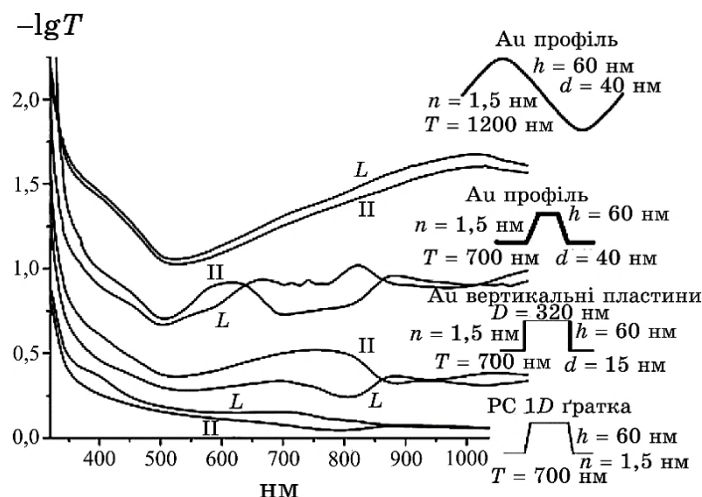
Рельєфи формотворної поверхні полімерних тиражованих деталей і поверхні після напорошення золота наведено на рис. 2. Для зручності порівняння профіль формотворної поверхні форми відображено в інвертованому вигляді. Зареєстровані незначні відмінності формотворної та полімерної копій можна віднести до одиничних дефектів і забруднень. Методика цілком надійно й адекватно технології уможливорює виміряти товщину й особливості розташування золота у зразках, що відповідають кривим 3 і 4 на рис. 2. В межах точности мірянь при використанні зонда з ра-



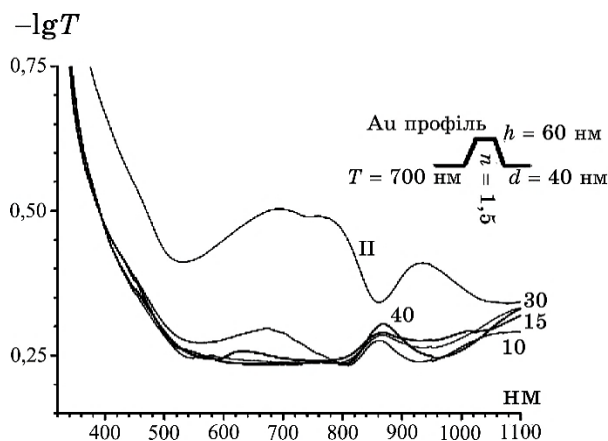
**Рис. 2.** Профілі поверхні нанооб'єктів: 1 — формотворної (інвертований); 2 — полімерної копії; 3 і 4 — полімерних копій після напорошення шару золота (3 — товщиною біля 15 нм на бічні поверхні рельєфу і 4 — після рівномірного покриття всіх поверхонь шаром завтовшки близько 40 нм).<sup>2</sup>

діюсом заокруглення у 10 нм відмінності між формотворною та полімерними копіями зареєструвати не вдалося.

Слід зазначити, що діелектричний профіль структури 3 на рис. 2 може бути використаний для виготовлення метал-діелектричних структур з подвоєною просторовою частотою (в нашому випадку період — біля 350 нм) за рахунок нанесення ме-



**Рис. 3.** Спектри екстинкції 1D-наноструктур: П — вектор напружености електричного поля паралельний створюваним ґратницям; L — перпендикулярний.<sup>3</sup>



**Рис. 4.** Спектри екстинкції 2D-наноструктур трапецієподібного профілю, що вкриті шаром золота товщиною у 40 нм, залежно від кута падіння. Кут падіння в ґрадах наведено біля відповідних спектрів.<sup>4</sup>

талевого шару переважно на похилі бокові поверхні профілю.

Спектри пропускання виготовлених наноструктур, яких наведено на рис. 3, 4, якісно відповідають існуючим уявленням [10, 11, 12] про дифракцію світла на одновимірних метал-діелектричних структурах.

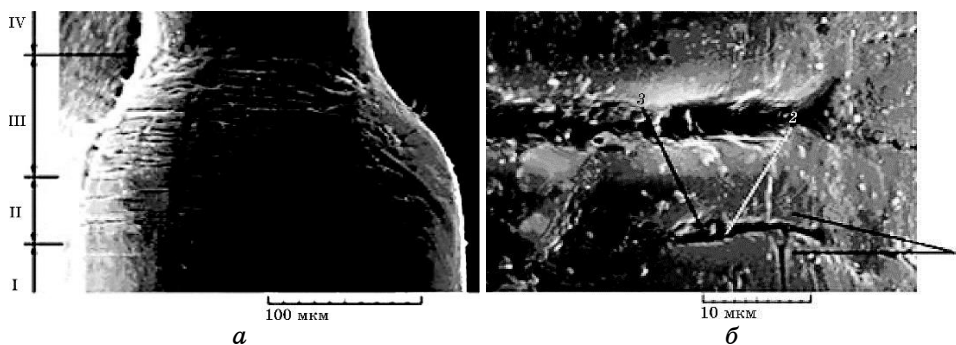
Край поглинання полікарбонату становить 345 нм. Екстремуми пропускання при 510 нм можна віднести до локальних плазмонів у наночастинках острівцевого золота. Екстремуми при 800 нм і 700 нм відповідають поверхневим плазмонам-поляритонам, локалізованим переважно на межі золото-полімер. Екстремуми в області 600 нм можуть бути віднесені до збуджень, локалізованих переважно на межі золото-повітря.

Порівнюючи спектри екстинкції трапецієподібних профілів із періодом у 700 нм і синусоподібної ґратниці з періодом у 1200 нм, бачимо, що для останньої моди 350–380 нм відсутні. Слід зазначити, що в спектрах екстинкції структур з трапецієподібним профілем присутні також і більш високі просторові частоти, що відповідають за екстремуми при 350–380 нм. Їх можна зв'язати із плазмонами на бокових стінках трапецієподібного профілю.

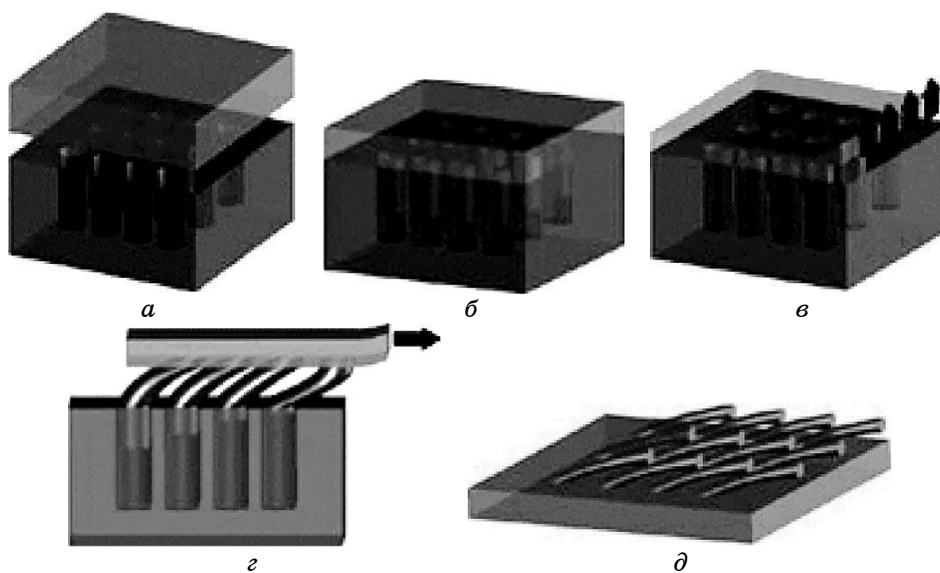
Залежності спектрів екстинкції від кута падіння більш складні. В них проявляється ще одна мода із максимумом при 640–680 нм, що залежить від кута падіння, яка при нормальному падінні є антисиметричною в центрі Бріллюєнової зони і не збуджується [13].

Слід зазначити, що в роботах [13, 14] наведено результати моделювання планарних метал-діелектричних структур. Одержані нами метал-діелектричні структури, яких наведено, зокрема, на рис. 4, лише в першому наближенні можуть розглядатися як планарні. Моделювання таких структур методами Грінєвих функцій [15], можливо, виявиться більш продуктивним.

Розроблені керовані темплати на основі АМН уможливають вирішувати завдання практичного управління електромагнетним випроміненням за допомогою нанотехнологій у текстильній промисловості з використанням процесу колірування (фарбування та друкування волокнистих матеріалів), наприклад у процесі крейзоутворення. Терміном крейзоутворення позначають явище утворення мікропорожнин і нанопор у полімерній матриці в процесі деформування полімеру в адсорбційно-активних рідких середовищах. Під час деформування волокна виникає система мікротріщин і нанопор, яка безперервно заповнюється навколишнім рідким середовищем, забезпечуючи тим самим можливість введення у структуру полімеру будь-яких несумісних з ним низькомолекулярних сполук і їх рівномірний розподіл у полімерній матриці (рис. 5). Фіксація модифікованої добавки здійснюється шляхом механічного захоплення низькомолекулярної компонен-



**Рис. 5.** Ділянки напруженого стану полієфірного волокна: (а) I — зародження кресів, II — ріст, III — поширення кресів, IV — формування фібрилярної структури волокна, стінки тріщини, тріщина, тяжі; (б) 1 — утворення кресів, 2, 3 — ріст з подальшим розривом.<sup>5</sup>



**Рис. 6.** Технологія наноімпринт-літографії [16]. Відтворення мікроструктури крила: а — накладення полімерної плівки на підкладку з нанорозмірними тріщинами; б — розм'якшення матеріалу та вдавлення його у пори; с — охолодження з відділенням полімерної плівки від матриці; д, е — накладення горизонтальної сили для остаточного формування структури.<sup>6</sup>

ти завдяки співмірності його молекулярних розмірів із розмірами пор у структурі волокна. Поверхня полімеру може бути структурованою за допомогою темплату.



Уявляється можливим використовувати технологію наноімпринт-літографії (рис. 6). У ній використовується полімер, який за певних температури та тиску (тобто в тих умовах, коли полімер переходить у в'язко-плинний стан) «заганяли» в упорядковані тріщини матриці, а потім охолоджувався.

Утворена полімерна плівка, яка відокремлюється від матриці за рахунок накладення одночасно вертикальної та латеральної (спрямованої у бік) сил. У результаті одержано структуру, оптичні властивості якої виявилися близькими до природнього аналогу. Матриця може бути створена у результаті тиражування темплату.

Для копіювання нанорельєфу форми литвом необхідно подолати тиск під викривленою поверхнею розтопленого полімеру з радіусом кривини, що знаходиться в нанометровому діапазоні, та забезпечити перетікання в'язкого полімеру у вузьких каналах форми. Для цього доводиться використовувати тиск близько  $10^8$  н/м<sup>2</sup>. У процесі лиття під тиском відбувається об'ємна усадка полімеру в результаті ущільнення топології молекулярних ланцюгів, перебігу хемічних реакцій і теплового розширення як пластмаси, так і формотворної поверхні. Для контролю цих чинників необхідно будувати тривимірні моделі течії, розширення й усадки полімеру, які уможливають проектувати формотворну поверхню форми для литва.

#### 4. ВИСНОВКИ

Протестовано методики тиражування найпростіших нанооб'єктів, — 1D-наноструктур золото-полімер, — литтям пластмаси під тиском з темплатних оригіналів. Виготовлено структури з періодом близько 700 нм. Методом сканувальної силової мікроскопії в межах точності мірянь у 10 нм різниці між формотворною та полімерними копіями зареєструвати не вдалося. Наявні промислові технології виготовлення формотворних гальванопластикою та тиражування литтям пластмаси під тиском в цілому є прийнятними для масового тиражування рельєфних наноструктур з періодом у 400–700 нм і точністю відтворення рельєфу близько 10 нм.

Ефективною методою виготовлення формотворних поверхонь є копіювання оригіналу методою гальванопластики. Метода застосовна тільки до оригіналів із геометрією поверхні, що забезпечує рознімання деталей після нарощування металу. Ця принципова особливість враховується при конструюванні форми у вигляді особливого розташування поверхонь розніму. Проте точність копіювання поверхні методою гальванопластики ймовірно лімітується процесами дефектоутворення на міжкристалітних межах

межі провідна формотворна поверхня–електроліт і може мати порядок одиниць нанометрів.

Для точності копіювання важливим є спосіб виготовлення електропровідного шару на поверхні оригіналу. Істотним є й механічне внутрішнє напруження в нарощуваному металі, що приводить до деформації як оригіналу, так і формотворної поверхні при нарощуванні шару металу. Навіть простий перелік проблем забезпечення точності при тиражуванні нанооб'єктів литтям полімерів під тиском показує складність і багатогранність технології.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. M. J. Weber, *Handbook of Optical Materials* (Boca Raton–London–New York–Washington, D.C: CRC PRESS: 2003).
2. *Физический энциклопедический словарь* (Ред. А. М. Прохоров) (Москва: Советская энциклопедия: 1984).
3. Д. А. Гринько, *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 1, № 1: 14 (1999).
4. А. А. Крючин, И. А. Косско, С. А. Фирстов, С. Н. Дуб, Д. А. Гринько, *Реєстрація, зберігання і обробка даних*, 3, № 2: 3 (2001).
5. Б. М. Брайнман, *Гальванопластика в промышленности* (Москва: НДНТП им. Дзержинского: 1978), с. 82.
6. Б. М. Брайнман, *Передовой производственный опыт* (Москва: ЦНИИТИ Легмаш: 1984), вып. 1, с. 7.
7. Г. А. Садаков, *Гальванопластика* (Москва: Машиностроение: 1987).
8. Г. Менгес, В. Микаэли, П. Морен, *Как делать литые формы* (Санкт-Петербург: Издат. «Профессия»: 2007) (пер. с англ.).
9. Д. А. Гринько, Ю. М. Барабаш, Е. В. Свеженцова, *III Міжнародна наукова конференція «Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- і наноструктур»*: Зб. наук. праць НФТЦ МОН та НАН України (Харків: 2009), с. 310.
10. М. Ю. Барабаш, А. А. Колесніченко, Д. С. Леонов, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, 15, вип. 4: 781 (2017).
11. M. Yu. Barabash, E. L. Martynchuk, and E. S. Zhitlukhina, 'XXII Galyna Puchkovska International School–Seminar Spectroscopy of Molecules and Crystals' (September 27–October 4, 2015, Chynadiyovo) (Uzhhorod: 2015), p. 260.
12. M. Yu. Barabash, G. G. Vlaykov, D. A. Grynko, and E. L. Martynchuk, *XIV Міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок і наноструктур (20–25 травня 2013, Івано-Франківськ)* (Івано-Франківськ: 2013), с. 113.
13. М. Ю. Барабаш, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, 7, вип. 2: 403 (2009).
14. M. Yu. Barabash, *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 6, No. 1: 01010(3pp) (2014).
15. Y. V. Demidenko, S. V. Kriuchenko, and V. Z. Lozovski, *Surf. Sci.*, 338: 283 (1995).
16. S. V. Sreenivasan, *Microsystems & Nanoengineering*, 3: 17075 (2017); [doi:10.1038/micronano.2017.75](https://doi.org/10.1038/micronano.2017.75).

## REFERENCES

1. M. J. Weber, *Handbook of Optical Materials* (Boca Raton–London–New York–Washington, D.C: CRC PRESS: 2003).
2. *Fizicheskii Ehntsiklopedicheskii Slovar'* (Ed. A. M. Prokhorov) (Moscow: Sovetskaya Ehntsiklopediya: 1984) (in Russian).
3. D. A. Grynko, *Reyestratsiya, Zberigannya i Obrobka Danykh*, **1**, No. 1: 14 (1999) (in Ukrainian).
4. A. A. Kryuchin, I. A. Kossko, S. A. Firstov, S. N. Dub, and D. A. Grinko, *Reyestratsiya, Zberigannya i Obrobka Danykh*, **3**, No. 2: 3 (2001) (in Russian).
5. B. M. Braynman, *Gal'vanoplastika v Promyshlennosti* (Moscow: NDNTP im. Dzerzhinskogo: 1978), p. 82 (in Russian).
6. B. M. Braynman, *Peredovoy Proizvodstvennyy Opyt* (Moscow: CNIITI Legmash: 1984), No. 1: p. 7.
7. G. A. Sadakov, *Gal'vanoplastika* (Moscow: Mashinostroenie: 1987) (in Russian).
8. G. Menges, W. Michaeli, and P. Mohren, *Kak Delat' Lit'evye formy* [How to Make Injection Molds] (Sankt-Petersburg: Izdat. 'Professija': 2007) (Russian translation).
9. D. A. Grynko, Yu. M. Barabash, and E. V. Svezhentsova, *III Mizhnarodna Naukova Konferentsiya 'Fizyko-Khimichni Osnovy Formuvannya i Modifikatsii Mikro- i Nanostruktur': Zb. Nauk. Prats' NFTTs MON ta NAN Ukrayiny* (Kharkiv: 2009), p. 310 (in Russian).
10. M. Yu. Barabash, A. A. Kolesnichenko, and D. S. Leonov, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **15**, No. 4: 781 (2017) (in Ukrainian).
11. M. Yu. Barabash, E. L. Martynchuk, and E. S. Zhitlukhina, 'XXII Galyna Puchkovska International School–Seminar Spectroscopy of Molecules and Crystals' (September 27–October 4, 2015, Chynadiyovo) (Uzhhorod: 2015), p. 260.
12. M. Yu. Barabash, G. G. Vlaykov, D. A. Grynko, and E. L. Martynchuk, *XIV Mizhnarodna Konferentsiya z Fizyky i Tekhnologii Tonkykh Plivok i Nanostruktur (20–25 May 2013, Ivano-Frankivsk)* (Ivano-Frankivsk: 2013), p. 113.
13. M. Yu. Barabash, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **7**, No. 2: 403 (2009) (in Ukrainian).
14. M. Yu. Barabash, *Journal of Nano- and Electronic Physics*, **6**, No. 1: 01010(3pp) (2014).
15. Y. V. Demidenko, S. V. Kriuchenko, and V. Z. Lozovski, *Surf. Sci.*, **338**: 283 (1995).
16. S. V. Sreenivasan, *Microsystems & Nanoengineering*, **3**: 17075 (2017); [doi:10.1038/micronano.2017.75](https://doi.org/10.1038/micronano.2017.75).

<sup>1</sup>Technical Centre, N.A.S. of Ukraine,

13, Pokrovska Str.,

UA-04070 Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Kyiv National University of Technologies and Design,

2, Nemyrovych-Danchenko Str.,

UA-01011 Kyiv, Ukraine

<sup>1</sup> Fig. 1. Morphology of the form-forming surface of form: *a*—image of the surface of the polymer layer of the template; *b*—image of a metal replica of this template.

---

<sup>2</sup> Fig. Surface profiles of nanoobjects: 1—forming (inverted); 2—polymer copy; 3 and 4—polymer copies after spraying a layer of gold (3—of about 15 nm thick on the side surfaces of the relief, 4—after uniform coverage of all surfaces with a layer of about 40 nm thick).

<sup>3</sup> Fig. 3 Extinction spectra of the 1D nanostructures:  $\Pi$ —vector of electric field strength parallel to the generating lattices;  $L$  is a perpendicular one.

<sup>4</sup> Fig. 4. The extinction spectra of the 2D nanostructures of trapezoidal profile covered with a layer of gold with a thickness of 40 nm, depending on the angle of incidence. The angle of incidence in degrees is given near the corresponding spectra.

<sup>5</sup> Fig. 5. Areas of stress of polyester fibre: (a) I—the origin of crazes, II—growth, III—the spread of crazes, IV—formation of the fibrillar structure of fibre, cracked walls, cracks, strands; (б) 1—the formation of crazes, 2, 3—growth followed by a gap.

<sup>6</sup> Fig. 6. Nanoimprint lithography technology [16]. Reproduction of the microstructure of the wing:  $a$ —application of a polymer film on a substrate with nanosize cracks;  $b$ —softening of the material and pressing it into the pores;  $c$ —cooling with separation of the polymer film from the matrix;  $z, d$ —the imposition of horizontal force for the final formation of the structure.