

УДК 621.382

DOI: 10.20535/2312-1807.2017.22.1.79672

Кравчук О. В., OrcID [0000-0001-5711-3629](https://orcid.org/0000-0001-5711-3629)e-mail: kravchuk.oleksandr@ukr.net

Національний університет „Львівська політехніка”

Бобицький Я. В., д.т.н., OrcID [0000-0002-6860-8595](https://orcid.org/0000-0002-6860-8595)e-mail: bobitski@polynet.lviv.ua

Університет Жешув, Польща

ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВОЇ ПЛАЗМОВОЇ ОБРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ПІДКЛАДОК НА АДГЕЗІЮ НАНЕСЕНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ СТРУМИННОГО ДРУКУ ШАРІВ НАНОЧАСТИНОК СРІБЛА

Досліджувався вплив на адгезію шарів наночастинок срібла (нанесених за допомогою струминного друку) плазмової обробки поверхні полімерних плівок. Вимірювання проводилися методом нормального відриву. На підкладці із поліетилентерефталату спостерігалось зростання адгезії після плазмової обробки на 75%, у той час, як виміряні значення для полііміду залишалися приблизно на одному рівні.

Бібл. 23, рис. 7

Ключові слова: адгезія; наночастинок срібла; струминний друк; гнучкі підкладки.

Вступ. Ресурсозбереження, ефективність виробництва та зниження ціни готових приладів набувають сьогодні усе більшого значення. Останні покоління дисплеїв [1], фотовольтаїчних модулів [2], елементів живлення [3], сенсорів [4] тощо передбачають використання гнучких підкладок. Процес виготовлення таких приладів передбачає проведення металізації підкладок. Огляд основних методів металізації показує, що найбільш поширені сьогодні методи металізації полімерів (вакуумне напылення, деякі хімічні методи) є досить складними, ресурсо- та часозатратними і часто вимагають використання резистів, розчинників або проявників, які несумісні з матеріалами органічної електроніки або полімерними підкладками [5, 6]. Актуальним є пошук адитивних безвідходних методів виготовлення окремих елементів електронних плат, зокрема струмопровідних доріжок. У цьому відношенні видається перспективним використання методу струминного друку колоїдними розчинами наночастинок з метою металізації поверхонь полімерів. Струминний друк потенційно забезпечує можливість швидкого «roll-to-roll» нанесення струмопровідних матеріалів, наприклад, наночастинок металів (як правило Ag, Au, Cu, Ni або Co) [7, 8, 9] або метал-органічних композитів [10]. Струминна технологія дозволяє проводити металізацію заданої топології жорстких чи гнучких підкладок з високим розділенням при мінімальних затратах матеріалів.

Адгезія надрукованих шарів до підкладки є одним з ключових параметрів, що має суттєве значення для отримання струмопровідних структур високої якості. Плазмохімічні процеси широко використовуються для зміни поверхневих властивостей матеріалів: адгезії, пористості, змочуваності, твердості, пластичності, хімічної активності, вмісту домішок, хімічної стійкості в агресивних середовищах тощо. Плазмову обробку поверхонь застосовують при трафаретному, офсетному або тампонному друці на полімерах, склі, металах. Застосування поверхневої плазмової обробки гнучких полімерних плівок ймовірно може бути ефективним методом для підвищення адгезії шарів, отриманих струминним друком.

Метою роботи є дослідження впливу обробки поверхні полімерних підкладок, а саме плівок полііміду (ПІ) та поліетилентерефталату (ПЕТ) з використанням плазми низького тиску на адгезію нанесених за допомогою струминного друку шарів наночастинок срібла

Матеріали, методи та обладнання. В роботі використовувалися комерційно доступний колоїдний розчин DGP 40TE-20C (Advanced Nano Products), що представляє собою дисперсну систему, наночастинок срібла якої мають спеціальне покриття з органічних сполук (Таблиця 1). Це покриття стабілізує частинки в розчиннику, запобігає їх агломерації та небажаному окисленню.



Таблиця 1.
Характеристики досліджуваного колоїду наночастинок срібла.

ANP DGP 40TE-20C	
Розчинник	Triethylenglycol-monomethylether
Розміри частинок	30–35 нм
Частка срібла	30–35% мас.
Густина	10–17 мПа·с
Поверхневий натяг	35–38 мН/м



Рис. 1. Послідовність операцій технологічного процесу формування струмопровідних шарів з використанням струминного друку колоїдом наночастинок срібла.

У якості підкладки у роботі було використано гнучкі плівки ПІ Kapton HN FI 16010 (DuPont) та ПЕТ Mylar A (DuPont) без додаткового покриття, що мають товщину 50 мкм та 125 мкм, відповідно. Для нанесення колоїдного розчину наночастинок срібла на підкладки використовувався модифікований принтер Omnijet 100 (UniJet).

На рис. 1 схематично показані складові колоїдних розчинів наночастинок та порядок основних операцій технологічного процесу формування струмопровідних шарів срібла на полімерних підкладках. Перед друком поверхні плівок були очищені у ізопропіловому спирті та деіонізованій воді в ультразвуковій ванні. Шорсткість поверхні полімерних плівок була встановлена оптичним методом за допомогою лазерного профілометра μscan (Nanofocus).

Для плазмової обробки підкладок було використано установку PICO (Diener elektronik). Для дослідження взаємодії між нанесеним розчином і підкладкою за допомогою установки OCA 15 (Data Physics Instruments) був виміряний кут змочування розчину на обох полімерних плівках. Розрахунок контактного кута змочування було здійснено згідно методу Оуенса-Вента [11]. Поверхнева енергія підкладок досліджувалися одразу після процесу очистки, а також після плазмової обробки.

Так як відразу після друку нанесені структури ще не мають бажаних електричних властивостей необхідною є їх термічна обробка (спикання).

Для дослідження впливу активації підкладок за допомогою плазми низького тиску було використано два гази: кисень та аргон. Час плазмової обробки варіювався від 30 с до 10 хв. (тиск у камері становив 0,3 мбар). Відразу після обробки на підкладки наносився розчин наночастинок срібла. Надруковані структури сушилися та спікалися у конвекційній печі. Внаслідок різної межі термічної стійкості двох матеріалів підкладки було використано різні температурні режими спікання: 160 °C/60 хв. для ПЕТ та 250 °C/60 хв. для ПІ. Після термічної обробки зразки готувалися до дослідження на відрив.

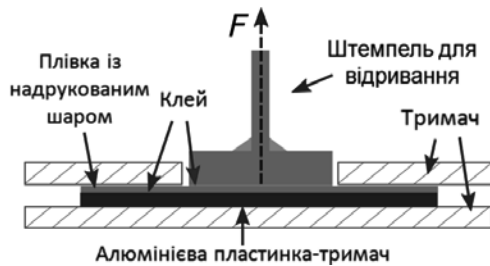


Рис. 2. Схема вимірювання адгезії за допомогою методу нормального відриву.

Для вимірювання адгезії надрукованих тонких шарів наночастинок на полімерних плівках було застосовано метод нормального відриву [12]. Схема тестової установки показана на рис. 2. На досліджуваний шар приклеювався спеціальний штампель, який після затвердіння клею відривався за допомогою розривної машини 5940 (Instron). За допомогою даного методу можна прямо вимірювати адгезію σ_A , що залежить від сили, яка необхідна для відривання шару від підкладки та площі поверхні приклеєного штампеля:

$$\sigma_A = \frac{F_{max}}{\pi \cdot r^2}$$

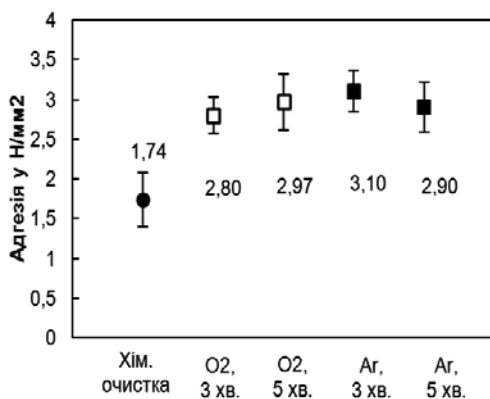


Рис. 3. Адгезія надрукованих шарів до ПЕТ (підкладки після хімічної очистки, а також O₂- та Ar-плазмової обробки).

Загалом, чим більшим є діаметр штампеля, тим точнішим є вимірювання, оскільки крайові ефекти чинять менший вплив на вимірювання [13]. До недоліків даного методу можна віднести імовірність проникнення клею на границю розділу шар-підкладка.

Для того, щоб мати можливість визначити адгезію шарів срібла на гнучких полімерних плівках, спочатку плівки з надрукованими та спече-

ними структурами за допомогою 2-компонентного клею Endfest 300 (UHU) були наклеєні на жорсткі алюмінієві пластинки. Штампелі (з діаметром 12,7 мм) за допомогою того ж клею фіксувалися на середині надрукованих структур. Для затвердіння клею зразки на протязі 10 хв. витримувалися при температурі 110 °С.

Результати досліджень. Виміряні значення шорсткості (R_a) поверхні плівки ПІ після процесу очистки становило приблизно 0,13 мкм, а для ПЕТ – близько 0,52 мкм. Встановлено, що кут змочування на обох підкладках після очистки становив близько 16°-17°. Для ПЕТ підкладки після плазмової обробки спостерігалось зростання значення поверхневої енергії від близько 32,2 мН/м (після хімічної очистки) до 68,7 мН/м (O₂-плазма, 3 хв.) та 61,4 мН/м (Ar-плазма, 3 хв.). Для ПІ підкладки поверхнева енергія зросла від близько 32,1 мН/м (після хімічної очистки) до 64,8 мН/м (O₂-плазма, 3 хв. та Ar-плазма, 3 хв.).

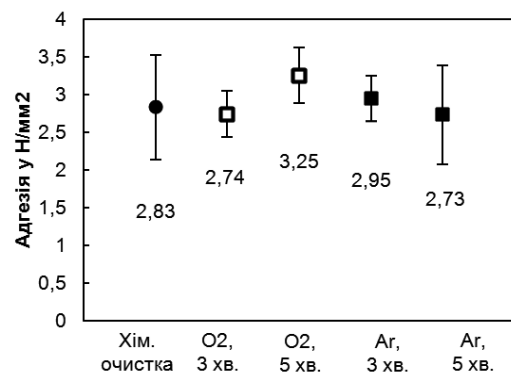


Рис. 4. Адгезія надрукованих шарів до ПІ (підкладки після хімічної очистки, а також O₂- та Ar-плазмової обробки).

Результати вимірювань адгезії надрукованих шарів показані на рис. 3 та 4. На плівці ПЕТ було виміряно значення адгезії $1,74 \pm 0,34$ Н/мм² (температура спікання 160 °С, хімічна очистка підкладки). Для ПЕТ підкладки можна спостерігати зростання адгезії після плазмової обробки підкладок до ≈ 3 Н/мм².

Виміряні значення адгезії для ПІ залишаються приблизно на одному рівні. Сила адгезії надрукованих шарів до плівки поліімиду після хімічної очистки (температура спікання 250 °С) становить $2,83 \pm 0,69$ Н/мм². Зразки демонструють адгезійний розрив між надрукованим шаром і підкладкою. Однак, як показано на рис. 5, г, після відриву на плівках, що піддавалися плаз-

мовій обробці перед процесом друку, присутні залишки шарів срібла.

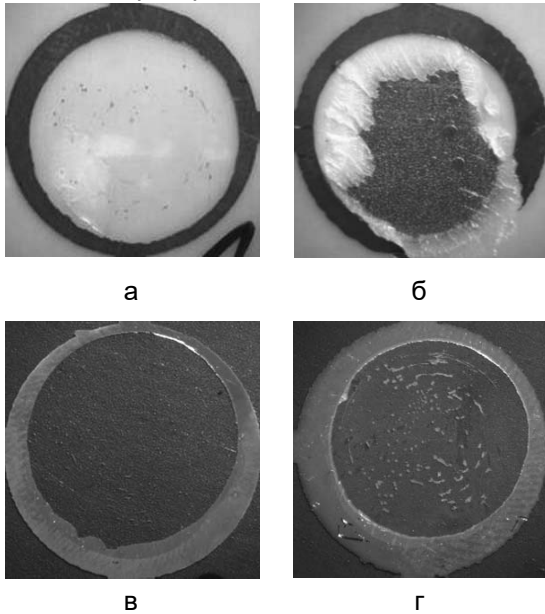
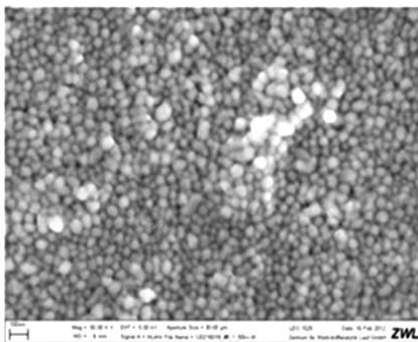
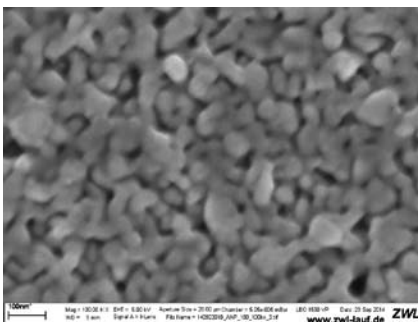


Рис. 5. Типова картина розриву для хімічно очищених підкладок: ПЕТ (а) та ПІ (в) і підкладок із O_2 плазмовою обробкою протягом 3 хв. ПЕТ (б) та ПІ (г).



а



б

Рис. 6. Морфологія поверхні нанесеного шару до (а) та після процесу спікання (б).

Обговорення. На рис. 6 показані зображення поверхні надрукованого на плівці шару срібла

після сушіння ($80\text{ }^\circ\text{C}/15\text{ хв.}$) рис. 6, а та після спікання ($250\text{ }^\circ\text{C}/60\text{ хв.}$) рис. 6, б, отримані за допомогою скануючого електронного мікроскопа. Морфологія поверхні надрукованого шару після сушіння відповідає кластерній структурі, кластери округлі або неправильної неізометричної форми. На рис. 6, б, можна побачити чітке зображення глобул, що утворилися внаслідок коалесценції наночастинок. Процес коалесценції супроводжується утворенням множини пустот, у яких можуть лишатися адсорбовані молекули залишкових газів атмосфери і залишки органічної фази.

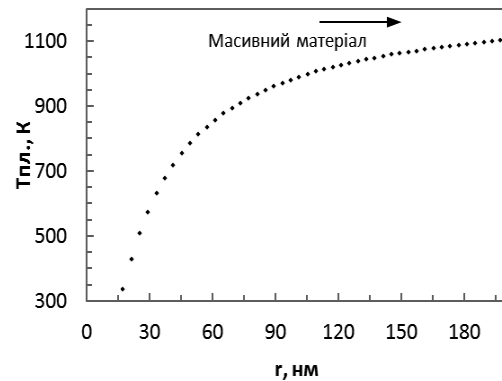


Рис. 7. Точка плавлення як функція радіусу частинки срібла згідно з термодинамічною моделлю [15].

Така поведінка може бути пояснена унікальними властивостями наночастинок металів, а саме розмірним ефектом плавлення. Наночастинки характеризуються значним співвідношенням поверхні до об'єму, чим пояснюється суттєве зниження температури плавлення наночастинок у порівнянні з більшими частинками (рис. 7) [14, 15]. Так як температура спікання матеріалу залежить від температури плавлення, зниження температури плавлення супроводжується зменшенням температури спікання [16]. Таким чином спікання наночастинок може відбуватися дуже швидко і, теоретично, також при порівняно низьких температурах.

Як відомо, адгезія характеризується силою зчеплення різномірних твердих та/або рідких фаз, в той час як когезійні сили виникають між молекулами одного і того ж матеріалу. Адгезійні сили виникають у приграничних шарах в результаті суперпозиції хімічних, фізичних та механічних взаємодій. На сьогодні в більшості робіт для вимірювання адгезії використовувався метод ґратчастого надрізу. Суть його полягає у нанесенні на надрукованих шарах, перпендикулярних один до одного, надрізів, що формують квадрати та відриві надрізаного шару за

допомогою клейкої стрічки [17, 18, 19, 20, 21]. Результати, як правило, оцінюють за 5-бальною шкалою, тому дослідження методом нормально-го відриву є кращим з точки зору отримання конкретних значень адгезії.

Після плазмової обробки полімерних підкладок спостерігалось зростання їх поверхневої енергії. При цьому для обох матеріалів спостерігалось зростання полярної складової із одночасним зменшенням дисперсної, що вказує на функціоналізацію поверхні полімерів, імовірно внаслідок радикалізації. Це також пояснює збільшення розтікання розчинів на поверхні підкладок. Для друку однорідних і чітких структур ключовими є поверхневі властивості підкладки, такі як шорсткість і поверхнева енергія, що визначають кут змочування.

Оброблені за допомогою плазми підкладки були досліджені з використанням скануючого електронного мікроскопа. На поверхні ПІ не було виявлено явних змін, натомість на ПЕТ-плівці, після тривалішої плазмової обробки (від 3 хв.) із використанням обох газів спостерігалось травлення поверхні.

Результати дослідження із використанням методу відриву показують, плазмова обробка має позитивний вплив на адгезію надрукованих шарів наночастинок. Виміряне значення адгезії до плівки ПЕТ помітно зростає, що також підтверджується картиною відриву. На хімічно-очищених зразках спостерігається адгезійний розрив між надрукованим шаром та підкладкою. На зразках після плазмової обробки відбувається розрив плівки ПЕТ, тобто адгезія шару до підкладки після плазмової обробки є вищою за когезійні сили у самій підкладці.

Числове значення адгезії для плівки ПІ залишалось в околі $2,9 \text{ Н/мм}^2$ як для зразків після хімічної очистки, так і після плазмової обробки.

У той же час про зростання адгезії надрукованих шарів можуть опосередковано свідчити залишки срібла плівці після відриву рис. 5, г.

Отримані значення адгезії шарів наночастинок срібла до ПЕТ-підкладки є досить близькими до результатів, описаних у публікаціях, де застосовувався подібний метод випробувань. У роботі [22] спостерігався внутрішній когезійний розрив у ПЕТ-плівці. Отримані значення адгезії на ПІ є дещо вищими у порівнянні з показаними у роботі [23] значеннями близько $1,25 \text{ Н/мм}^2$ (для невідомого розчину наночастинок срібла).

Висновки. Методом струминного друку на гнучких підкладках ПІ та ПЕТ були отримані шари срібла, що відрізняються високою адгезією до підкладки. Для обох типів досліджуваних підкладок спостерігалось зростання загальної поверхневої енергії після обробки з використанням плазми кисню та аргону майже в два рази (при чому зростала полярна складова і зменшувалась дисперсна).

Було встановлено, що адгезія надрукованих та термічно спечених шарів срібла досягає значень близько 3 Н/мм^2 на ПІ і близько $1,7 \text{ Н/мм}^2$ на ПЕТ плівці (без попередньої плазмової обробки), що перевищує відомі з літератури значення для надрукованих шарів наночастинок.

Встановлено, що застосування плазмової обробки дозволяє отримати зростання адгезії надрукованих шарів до плівки ПЕТ

В роботі показано, що використання обробки за допомогою плазми плівок ПЕТ дозволяє суттєво підвищити адгезію надрукованих шарів до підкладок. отримані результати свідчать про перспективність струминного методу селективного формування струмопровідних шарів на гнучких полімерних підкладках у виробництві електронної техніки.

Надійшла до редакції 10 грудня 2016 р.

Література

1. Kawahara, J. Flexible active matrix addressed displays manufactured by printing and coating techniques / J. Kawahara, P. A. Ersman, D. Nilsson // J Polym Sci Part B: Polym Phys. – 2013, № 4., pp. 265–271. DOI: [10.1016/j.orgel.2013.10.008](https://doi.org/10.1016/j.orgel.2013.10.008).
2. Chen, J. Flexible photovoltaic cells based on a graphene–CdSe quantum dot nanocomposite / J. Chen, F. Xu, J. Wu, K. Qasim // Nanoscale. – 2012, № 4, pp. 441–443. DOI: [10.1039/c2nr11656a](https://doi.org/10.1039/c2nr11656a).
3. Gaikwad, A. M. A flexible high potential printed battery for powering printed electronics / A. M. Gaikwad, D. A. Steingart, T. N. Ng, D. E. Schwartz, G. L. Whiting // Appl. Phys. Lett. – 2013, № 102, 233302. DOI: [10.1063/1.4810974](https://doi.org/10.1063/1.4810974).
4. Kravchuk, O. Properties and long-term behavior of nanoparticle based inkjet printed strain gauges / O. Kravchuk, M. Reichenberger // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2016, № 27, 10, pp. 10934–10940. DOI: [10.1007/s10854-016-5207-9](https://doi.org/10.1007/s10854-016-5207-9).



5. DeGans, B. J. Inkjet printing of polymers: state of the art and future developments / B. J. DeGans, P. C. Duineveld, U. S. Schubert // *Advanced materials*. – 2004, № 16(3), pp. 203–213. DOI: [10.1002/adma.200300385](https://doi.org/10.1002/adma.200300385).
6. Logothetidis, S. Flexible organic electronic devices: Materials, process and applications / S. Logothetidis // *Materials Science and Engineering: B*. – 2008, № 152(1): pp. 96–104. DOI: [10.1016/j.mseb.2008.06.009](https://doi.org/10.1016/j.mseb.2008.06.009).
7. Perelaer, J. Printed electronics: the challenges involved in printing devices, interconnects, and contacts based on inorganic materials / J. Perelaer, P. J. Smith, D. Mager, D. Soltman, S. K. Volkman, V. Subramanian // *J. Mater. Chem.* – 2010, № 20 (39), pp. 8446–8453. DOI: [10.1039/C0JM00264J](https://doi.org/10.1039/C0JM00264J).
8. Bidoki, S. M. Ink-jet fabrication of electronic components / S. M. Bidoki, D. M. Lewis, M. Clark, A. Vakorov, P. A. Millner, D. McGorman // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2007, № 17(5), pp. 967–974. DOI: [10.1088/0960-1317/17/5/017](https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/5/017).
9. Khan, S. Bendable piezoresistive sensors by screen printing MWCNT/PDMS composites on flexible substrates / S. Khan, L. Lorenzelli, R. S. Dahiya // *Proc. of 10th Conference on Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)*, June 30th – July 3rd 2014. – Grenoble, 2014. DOI: [10.1109/PRIME.2014.6872702](https://doi.org/10.1109/PRIME.2014.6872702).
10. Zhang, Z. Synthesis of monodisperse silver nanoparticles for ink-jet printed flexible electronics / Z. Zhang, X. Zhang, Z. Xin, M. Deng, Y. Wen, Y. Song // *Nanotechnology*. – 2011, № 22(42):425601. DOI: [10.1088/0957-4484/22/42/425601](https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/42/425601).
11. Owens, D. Estimation of the Surface Free Energy of Polymers / D. Owens, R. Wendt // *J. Appl. Polym. Sci.* – 1969 № 13, pp. 1741–1747. DOI: [10.1002/app.1969.070130815](https://doi.org/10.1002/app.1969.070130815).
12. ДСТУ ISO 4624:2015 Фарби та лаки. Визначення адгезії методом відриву.
13. Goßmann, J. Einfluss von Plasmabehandlungen auf die Haftfestigkeit vakuumtechnisch hergestellter Polymer-Metal-Verbunde / J. Goßmann, Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität – Erlangen, 2008. – 173 s.
URL: https://opus4.kobv.de/opus4-fau/files/940/JoernGrossmann_Dissertation.pdf.
14. Castro, T. Size-dependent melting temperature of individual nanometer-sized metallic clusters / T. Castro, R. Reifemberger, E. Choi // *Physical review B*. – 1990, № 42(13), p. 8548.
DOI: [10.1103/PhysRevB.42.8548](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.42.8548).
15. Semenchenko, V. K. Surface Phenomena in Metals and Alloys / V. K. Semenchenko. – Oxford: Pergamon Press, 1962 – p. 137. URL: https://www.researchgate.net/publication/44465266_Surface_phenomena_in_metals_and_alloys_VK_Semenchenko.
16. Troitskii, V. N. Initial Sintering Temperature of Ultrafine Powders / V. N. Troitskii, A. Z. Rakhmatullina, V. I. Berestenko, S. V. Gurov // *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – 1983 № 22, pp. 12–14. DOI: [10.1007/BF00792502](https://doi.org/10.1007/BF00792502).
17. Solodovnyk, A. N. Involving Low-Pressure Plasma for Surface Pre-Treatment and Post Print Sintering of Silver Tracks on Polymer Substrates / A. N. Solodovnyk, W. Li, F. Fei, Q. Chen // *Proc. of the international conference nanomaterials: applications and properties*. 17–22.09.12 – Alushta, 2012 № 1 no 4, pp. 265–271.
URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/princon_2012_1_4_39.
18. Halonen, E. Oven sintering process optimization for inkjet-printed Ag nanoparticle ink / E. Halonen, T. Viiru, K. Ostman, A. L. Cabezas, M. Mantysalo // *IEEE Trans. Compon., Packag. Manuf. Technol.*, – 2013 № 3, 2, pp. 350–356.
DOI: [10.1109/TCPMT.2012.2226458](https://doi.org/10.1109/TCPMT.2012.2226458).
19. Huang, Y. K. Fabrication of Copper Thin Film Patterns with Highly Adhesive Silver-Decorated Polydopamine Ink / Y. K. Huang, S. P. Chen, S. Chun-Hao, Y. C. Liao // *Sci. Adv. Mater.* – 2015 № 7, pp. 227. DOI: [10.1016/j.jcis.2016.05.051](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.05.051).
20. Li, Z. Highly Conductive, Flexible, Polyurethane-Based Adhesives for Flexible and Printed Electronics / Z. Li, R. Zhang, K. S. Moon, Y. Liu, K. Hansen, T. Le, C. P. Wong // *Advanced Functional Materials*. – 2012 № 23 (11), pp. 1459–1465. DOI: [10.1186/1556-276X-8-147](https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-147).
21. Lee, J. Room-temperature nanosoldering of a very long metal nanowire network by conducting-polymer-assisted joining for a flexible touch-panel application / J. Lee, P. Lee, H. B. Lee, S. Hong, I. Lee, J. Yeo, S. S. Lee, T. S. Kim, D. Lee // *Advanced Functional Materials*. – 2013 № 23 (34), pp. 4171–4176. DOI: [10.1002/adfm.201203802](https://doi.org/10.1002/adfm.201203802).

22. Smolarek, A. Adhesion phenomenon of electrically conductive paths printed by nanoinks to typical substrates / A. Smolarek, T. Fałat, A. Mościcki, A. Kinart, J. Felba, R. Kosowski // Proc. of 36th International Microelectronics and Packaging Conference IMAPS-CPMT, Kołobrzeg, 2012. pp. 26–29. URL: http://www.amepox-mc.com/get_file.php?id=42.
23. Caglar, U. Analysis of mechanical performance of silver Inkjet-printed structures / U. Caglar, K. Kaija, P. Mansikkamäki // Proc. of 2nd, IEEE INEC, Tampere, – 2008 pp. 851–856. DOI: [10.1109/INEC.2008.4585617](https://doi.org/10.1109/INEC.2008.4585617).

УДК 621.382

Кравчук О. В., OrcID [0000-0001-5711-3629](https://orcid.org/0000-0001-5711-3629)

e-mail: kravchuk.oleksandr@ukr.net

Национальный университет „Львовская политехника“

Бобицкий Я. В., д.т.н. OrcID [0000-0002-6860-8595](https://orcid.org/0000-0002-6860-8595)

e-mail: bobitski@polynet.lviv.ua

Университет Жешув, Польша

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОДЛОЖЕК НА АДГЕЗИЮ НАНЕСЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ СТРУЙНОЙ ПЕЧАТИ СЛОЕВ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА

Исследовалось влияние на адгезию слоев наночастиц серебра (нанесенных с помощью струйной печати) плазменной обработки поверхности полимерных пленок. Измерения проводились методом нормального отрыва. На подложке из полиэтилентерефталата наблюдался рост адгезии после плазменной обработки на 75%, в то время, как измеренные значения для полиимида оставались примерно на одном уровне.

Библ. 23, рис. 7

Ключевые слова: адгезия, наночастицы серебра, струйная печать, гибкие подложки.

UDC 621.382

Kravchuk O. V., OrcID [0000-0001-5711-3629](https://orcid.org/0000-0001-5711-3629)

e-mail: kravchuk.oleksandr@ukr.net

Lviv Polytechnic National University

Bobitsky Ya. V., D.Sc. (Eng.) OrcID [0000-0002-6860-8595](https://orcid.org/0000-0002-6860-8595)

e-mail: bobitski@polynet.lviv.ua

University of Rzeszów

EFFECT OF PLASMA SURFACE TREATMENT OF POLYMERIC SUBSTRATES ON THE ADHESION OF JET-PRINTED SILVER NANOPARTICLE LAYERS

The effect of plasma surface treatment of polymer films on adhesion of jet printed silver nanoparticles layers was studied. The measurements were carried out by using of tensile testing machine. After plasma treatment an increase by 75% in adhesion was measured on the polyethylene terephthalate substrate, while the values on polyimide remain at the same level.

Ref. 23, fig. 7.

Keywords: adhesion, silver nanoparticles, inkjet printing, flexible substrates.



References

- [1]. J. Kawahara, P. A. Ersman, D. Nilsson, "Flexible active matrix addressed displays manufactured by printing and coating techniques," *J Polym Sci Part B: Polym Phys*, 4, pp. 265–271, 2013. DOI: [10.1016/j.orgel.2013.10.008](https://doi.org/10.1016/j.orgel.2013.10.008).
- [2]. J. Chen, F. Xu, J. Wu, K. Qasim, "Flexible photovoltaic cells based on a graphene–CdSe quantum dot nanocomposite," *Nanoscale*, 4, pp. 441–443, 2012. DOI: [10.1039/c2nr11656a](https://doi.org/10.1039/c2nr11656a).
- [3]. A. M. Gaikwad, D. A. Steingart, T. N. Ng, D. E. Schwartz, G. L. Whiting, "A flexible high potential printed battery for powering printed electronics," *Appl. Phys. Lett.* 102, 233302, 2013. DOI: [10.1063/1.4810974](https://doi.org/10.1063/1.4810974).
- [4]. O. Kravchuk, M. Reichenberger, "Properties and long-term behavior of nanoparticle based inkjet printed strain gauges," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27, 10, pp. 10934–10940, 2016. DOI: [10.1007/s10854-016-5207-9](https://doi.org/10.1007/s10854-016-5207-9).
- [5]. B. J. DeGans, P. C. Duineveld, U. S. Schubert, "Inkjet printing of polymers: state of the art and future developments," *Advanced materials*, 16(3), pp. 203–213, 2004. DOI: [10.1002/adma.200300385](https://doi.org/10.1002/adma.200300385).
- [6]. S. Logothetidis, "Flexible organic electronic devices: Materials, process and applications," *Materials Science and Engineering: B*. 152(1): pp. 96–104, 2008. DOI: [10.1016/j.mseb.2008.06.009](https://doi.org/10.1016/j.mseb.2008.06.009).
- [7]. J. Perelaer, P. J. Smith, D. Mager, D. Soltman, S. K. Volkman, V. Subramanian, "Printed electronics: the challenges involved in printing devices, interconnects, and contacts based on inorganic materials," *J. Mater. Chem.* 20 (39), pp. 8446–8453, 2010. DOI: [10.1039/C0JM00264J](https://doi.org/10.1039/C0JM00264J).
- [8]. S. M. Bidoki, D. M. Lewis, M. Clark, A. Vakorov, P. A. Millner, D. McGorman, "Ink-jet fabrication of electronic components," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 17(5), pp. 967–974, 2007. DOI: [10.1088/0960-1317/17/5/017](https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/5/017).
- [9]. S. Khan, L. Lorenzelli, R. S. Dahiya, "Bendable piezoresistive sensors by screen printing MWCNT/PDMS composites on flexible substrates," Proc. of 10th Conference on Research in Microelectronics and Electronics (PRIME), 2014 DOI: [10.1109/PRIME.2014.6872702](https://doi.org/10.1109/PRIME.2014.6872702).
- [10]. Z. Zhang, X. Zhang, Z. Xin, M. Deng, Y. Wen, Y. Song, "Synthesis of monodisperse silver nanoparticles for ink-jet printed flexible electronics," *Nanotechnology*. 22(42):425601, 2011. DOI: [10.1088/0957-4484/22/42/425601](https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/42/425601).
- [11]. D. Owens, R. Wendt, "Estimation of the Surface Free Energy of Polymers," *J. Appl. Polym. Sci.*, 13, pp. 1741–1747, 1969. DOI: [10.1002/app.1969.070130815](https://doi.org/10.1002/app.1969.070130815)
- [12]. ISO 4624:2002. Paints and varnishes -Pull-off test for adhesion.
- [13]. J. Goßmann, "Einfluss von Plasmabehandlungen auf die Haftfestigkeit vakuumtechnisch hergestellter Polymer-Metal-Verbunde," Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen, 2008. URL: https://opus4.kobv.de/opus4-fau/files/940/JoernGrossmann_Dissertation.pdf
- [14]. T. Castro, R. Reifemberger, E. Choi, "Size-dependent melting temperature of individual nanometer-sized metallic clusters," *Physical review B.*, vol. 42(13), p. 8548, 1990. DOI: [10.1103/PhysRevB.42.8548](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.42.8548).
- [15]. V. K. Semenchenko. *Surface Phenomena in Metals and Alloys*, Pergamon Press, Oxford, p. 137, 1962. URL: https://www.researchgate.net/publication/44465266_Surface_phenomena_in_metals_and_alloys_VK_Semenchenko.
- [16]. V. N. Troitskii, A. Z. Rakhmatullina, V. I. Berestenko, S. V. Gurov, "Initial Sintering Temperature of Ultrafine Powders," *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics* 22, pp. 12–14, 1983. DOI: [10.1007/BF00792502](https://doi.org/10.1007/BF00792502).
- [17]. A. N. Solodovnyk, W. Li, F. Fei, Q. Chen, "Involving Low-Pressure Plasma for Surface Pre-Treatment and Post Print Sintering of Silver Tracks on Polymer Substrates," Proc. of the international conference nanomaterials: applications and properties, vol. 1 no 4, pp. 265–271, 2012 URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/princon_2012_1_4_39.
- [18]. E. Halonen, T. Viiru, K. Ostman, A. L. Cabezas, M. Mantysalo, "Oven sintering process optimization for inkjet-printed Ag nanoparticle ink," *IEEE Trans. Compon., Packag. Manuf. Technol.*, vol. 3 no. 2, pp. 350–356, 2013. DOI: [10.1109/TCPMT.2012.2226458](https://doi.org/10.1109/TCPMT.2012.2226458).

- [19]. Y. K. Huang, S. P. Chen, S. Chun-Hao, Y. C. Liao, "Fabrication of Copper Thin Film Patterns with Highly Adhesive Silver-Decorated Polydopamine Ink," *Sci. Adv. Mater.*, 7, p. 227, 2015. DOI: [10.1016/j.jcis.2016.05.051](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.05.051).
- [20]. Z. Li, R. Zhang, K. S. Moon, Y. Liu, K. Hansen, T. Le, C. P. Wong, "Highly Conductive, Flexible, Polyurethane-Based Adhesives for Flexible and Printed Electronics," *Advanced Functional Materials*, 23 (11), pp. 1459–1465, 2012. DOI: [10.1186/1556-276X-8-147](https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-147).
- [21]. J. Lee, P. Lee, H. B. Lee, S. Hong, I. Lee, J. Yeo, S. S. Lee, T. S. Kim, D. Lee, "Room-temperature nanosoldering of a very long metal nanowire network by conducting-polymer-assisted joining for a flexible touch-panel application," *Advanced Functional Materials* 23 (34), pp. 4171–4176, 2013. DOI: [10.1002/adfm.201203802](https://doi.org/10.1002/adfm.201203802).
- [22]. A. Smolarek, T. Fałat, A. Mościcki, A. Kinart, J. Felba, R. Kosowski, "Adhesion phenomenon of electrically conductive paths printed by nanoinks to typical substrates" Proc. of 36th International Microelectronics and Packaging Conference IMAPS-CPMT, Kołobrzeg, Poland. pp. 26–29, 2012. URL: http://www.amepox-mc.com/get_file.php?id=42.
- [23]. U. Caglar, K. Kaija, P. Mansikkamäki, "Analysis of mechanical performance of silver Inkjet-printed structures," Proc. of 2nd, IEEE INEC, Tampere, pp. 851–856, 2008. DOI: [10.1109/INEC.2008.4585617](https://doi.org/10.1109/INEC.2008.4585617).