

УДК: 66.03

DOI: 10.20535/iwccmm2025326269

ОДЕРЖАННЯ ІНФУЗОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ НА ОСНОВІ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК

Олексій МИРОНЮК,

Д.т.н., доц.,

КПІ ім. Ігоря Сікорського

o.myronyuk@kpi.ua**Денис МАКОВСЬКИЙ,**

Аспірант,

КПІ ім. Ігоря Сікорського

makovskiy.denis@iill.kpi.ua

Анотація. Інфузовані поверхні (SLIPS — Slippery Liquid-Infused Porous Surfaces) становлять інтерес як перспективний тип функціональних покриттів завдяки своїм унікальним властивостям: високій здатності до відштовхування рідин, низькій адгезії, самовідновлюваності та стабільності в агресивних середовищах. У роботі розглянуто основні принципи формування SLIPS-покриттів на основі полімерних плівок, що включають два ключові етапи: створення пористої мікро- або нанотекстурованої поверхні та її просочення в'язкою мастильною рідиною. Описано два підходи до формування таких структур. Перший – темплатний метод із використанням лазерної обробки металевих поверхонь для створення негативів текстури з подальшим термоформуванням полімерних плівок. Цей метод демонструє потенціал для масштабованого виробництва завдяки сумісності з існуючими технологіями переробки полімерів. Другий – метод безпосереднього нанесення текстурованих шарів із використанням функціональних частинок (ZnO , TiO_2) та полімерних матриць, що хоча і забезпечує високу ефективність, але ускладнює виробництво через високу вартість реагентів і складність технології. Зроблено висновок, що метод формування SLIPS із використанням лазерно створених темплатів є доцільним для подальших досліджень у напрямку промислового виробництва захисних покриттів на основі полімерних плівок.

Ключові слова: інфузовані поверхні, SLIPS, полімерні плівки, лазерна обробка, термоформування, темплати, мастильні рідини, мікротекстурування

Інфузовані поверхні або SLIPS (від Slippery Liquid-Infused Porous Surfaces вперше описані групою Дж. Айзенберг [1]) останнім часом активно досліджуються через їх унікальні властивості – підвищеного відштовхування рідин, включаючи і неполярні, здатності до масовідновлювання, низькими значеннями адгезії. Такі матеріали мають перспективу до широкого застосування в біомедичних пристроях, суднобудуванні та криговідштовхувальних антикорозійних покриттях [2]. Основний принцип

ефекту реалізується при створенні пористої полімерної плівки, її просоченні в'язкими неполярними рідинами, що забезпечує створення двофазної поверхні: рідина зв'язана в нерівностях текстури.

Однією з головних переваг таких покриттів є їхня підвищена довговічність та стабільність навіть у складних експлуатаційних умовах у порівнянні з, наприклад, спорідненою технологією супергідрофобних покриттів. Завдяки особливостям структури і можливості створення на поверхнях полімерних плівок, вони можуть бути пристосовані до різних середовищ і бути високоефективними у захисті від забруднень.

Процес створення SLIPS складається з двох основних етапів: формування пористої поверхні та інфузування мастильною рідиною. Перший етап передбачає створення мікро- або нано пористої структури. Другий етап включає просочування цієї пористої матриці рідиною, яка має бути хімічно сумісною з матеріалом основи, не випаровуватися та зберігати стабільність у різних умовах. Ідеальні мастильні рідини – це фторовані або силіконові масла з низькою поверхневою енергією, що забезпечують довговічність і ефективність покриття.

Головною задачею при створенні SLIPS-текстур на поверхні полімерних плівок є формування придатної текстури поверхні. Одним з небагатьох методів, придатних до масштабування, який дозволяє вирішити цю задачу є метод темплатів, який полягає у створенні негативів потрібних текстур (темплатів) на поверхні металів і наступне використання їх для формування цільових текстур на поверхнях полімерних плівок термопресуванням. Даний метод може значно здешевити виробництво SLIPS на основі полімерних плівок, адже нанесення відбитків може бути масштабованим за рахунок використання валкових пресів на вже існуючих плівках.

Метод лазерної обробки є гарним кандидатом для одержання прецизійних текстур на поверхні металів. Наприклад, в [3] наведено спосіб такої обробки: спочатку алюмінієві пластини очищають у деіонізованій воді, етанолі та ацетоні для видалення пилу та жиру. Далі на поверхні створюють мікро- і

наноструктури за допомогою імпульсного лазера (1064 нм, 20 кГц, 50 мкм, 200 мм/с). Після лазерної обробки зразки промивають у деіонізованій воді ультразвуком і висушують потоком азоту. Для надання супергідрофобних властивостей поверхню занурюють у 1% розчин FAS в етанолі (~40 хв), а потім нагрівають при 150 °С протягом 30 хв. Після цього зразки просочують мастильною рідиною (~10 хв), а потім вертикально витримують (~30 хв) для видалення надлишків і формування рівномірного шару мастила.

Слід зазначити що метод лазерного текстурування, хоча і може бути використаний безпосередньо для формування текстури на поверхні полімерних плівок, потребує модифікації їх хімічного складу а також не є настільки високошвидкісним щоб його кандидатуру можна було розглядати як шлях масштабування технології.

Як альтернатива темплатному методу існує метод безпосереднього одержання плівок з потрібною текстурою на основі частинок. Наприклад, в роботі [4] для забезпечення рівномірної товщини мікроструктурованого шару використовували метод крапельного нанесення: підготовлені розчини ZnO та PDMS наносили на очищене скло та видаляли надлишок за допомогою аплікатора з зазором 300 μm . Далі покриті скляні пластини частково полімеризували в печі при 80 °С протягом 30 хв. Після часткової полімеризації зразки занурювали в дисперсію TiO_2 і піддавали ультразвуковій обробці (30 хв), що сприяло фізичному закріпленню наночастинок на поверхні. Потім зразки діставали з розчину та повністю полімеризували при 80 °С протягом 45 хв. На фінальному етапі на супергідрофобну поверхню наносили силіконове масло, яке рівномірно розтікалося та створювало інфузійний шар.

Проблемою другого методу одержання покриттів є складна процедура нанесення, використання принципово дорогих реагентів, що підвищує собівартість матеріалів та складнощі в досягненні цим методом механічних властивостей, характерних для екструзійних плівок.

Шляхом для вирішення цих проблем може бути використання методу лазерної обробки для створення негативних відтисків структури SLIPS, які

надалі будуть використані для теромоформування поверхні полімерних плівок. Розробка цього підходу зумовить необхідність більш детального розгляду процесів перенесення текстур з поверхні металевих темплатів, мікрореологічних особливостей розплавів полімерів, які працюють в малорозмірних каналах порядку десятків мікрометрів, утворення макромолекулярної псевдокристалічної структури полімерів в таких умовах і вплив цього на остаточний профіль текстури.

ВИСНОВКИ

Показано, що виробництво інфузованих поверхонь є новим і досить перспективним напрямком дослідження. Було розглянуто два методи виробництва інфузованих поверхонь, а саме метод лазерної обробки та метод нанесення плівок з дисперсій. Обґрунтовано що метод лазерної обробки є більш придатним для виробництва інфузованих поверхонь на основі полімерних плівок через послідовні стадії формування металевих негативів та термоформування поверхні цільових плівок цими негативами.

Список літератури:

1. Wong, T., Kang, S. H., Tang, S. K. Y., Smythe, E. J., Hatton, B. D., Grinthal, A., & Aizenberg, J. (2011). Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity. *Nature*, 477(7365), 443–447. <https://doi.org/10.1038/nature10447>
2. Juuti, P., Haapanen, J., Stenroos, C., Niemelä-Anttonen, H., Harra, J., Koivuluoto, H., Teisala, H., Lahti, J., Tuominen, M., Kuusipalo, J., Vuoristo, P., & Mäkelä, J. M. (2017). Achieving a slippery, liquid-infused porous surface with anti-icing properties by direct deposition of flame synthesized aerosol nanoparticles on a thermally fragile substrate. *Applied Physics Letters*, 110(16). <https://doi.org/10.1063/1.4981905>
3. Pan, W., Ma, J., Yan, D., Xu, W., Chen, Y., Huang, L., & Song, J. (2023). A facile and high-efficient method to fabricate slippery liquid-infused porous surface with enhanced functionality. *Surface and Coatings Technology*, 472, 129897. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129897>
- Kouhpour, A., Goudarzi, S., Eslami, R., & Zarrin, H. (2024). Micro-nano-engineered slippery liquid-infused porous surface coating with highly sustainable superhydrophobicity and omniphobicity. *Progress in Organic Coatings*, 187, 108182. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.108182>

References:

1. Wong, T., Kang, S. H., Tang, S. K. Y., Smythe, E. J., Hatton, B. D., Grinthal, A., & Aizenberg, J. (2011). Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity. *Nature*, 477(7365), 443–447. <https://doi.org/10.1038/nature10447>

2. Juuti, P., Haapanen, J., Stenroos, C., Niemelä-Anttonen, H., Harra, J., Koivuluoto, H., Teisala, H., Lahti, J., Tuominen, M., Kuusipalo, J., Vuoristo, P., & Mäkelä, J. M. (2017). Achieving a slippery, liquid-infused porous surface with anti-icing properties by direct deposition of flame synthesized aerosol nanoparticles on a thermally fragile substrate. *Applied Physics Letters*, 110(16). <https://doi.org/10.1063/1.4981905>
3. Pan, W., Ma, J., Yan, D., Xu, W., Chen, Y., Huang, L., & Song, J. (2023). A facile and high-efficient method to fabricate slippery liquid-infused porous surface with enhanced functionality. *Surface and Coatings Technology*, 472, 129897. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129897>
4. Kouhpour, A., Goudarzi, S., Eslami, R., & Zarrin, H. (2024). Micro-nano-engineered slippery liquid-infused porous surface coating with highly sustainable superhydrophobicity and omniphobicity. *Progress in Organic Coatings*, 187, 108182. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.108182>

PRODUCTION OF INFUSED SURFACES BASED ON POLYMER FILMS

Denis MAKOVSKIY

PhD student,

Oleksiy MYRONYUK

Doctor of Technical Sciences, Associate professor,

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Abstract. *Slippery Liquid-Infused Porous Surfaces (SLIPS) are a promising class of functional coatings due to their unique properties, including high liquid repellency (even for non-polar liquids), low adhesion, self-healing capabilities, and long-term stability in aggressive environments. This paper discusses the main principles of SLIPS fabrication based on polymer films, which typically involves two key steps: the formation of a porous micro- or nanostructured surface and its infusion with a viscous lubricating liquid. Two fabrication approaches are considered. The first is the template-based method, which involves laser texturing of metal surfaces to create negative molds that are subsequently used for thermoforming polymer films. This technique shows strong potential for scalable production, particularly because it is compatible with existing industrial polymer processing technologies. The second approach involves direct deposition of textured layers using functional particles (such as ZnO or TiO₂) embedded in polymer matrices. While this method enables the formation of effective SLIPS layers, it poses challenges related to high material costs and complex processing steps. The study concludes that the use of laser-generated templates for thermoforming SLIPS structures on polymer films is a more practical and scalable approach. This method holds promise for future research focused on the industrial application of SLIPS coatings for protective and anti-fouling purposes.*

Keywords: *SLIPS, infused surfaces, polymer films, laser processing, thermoforming, templates, lubricating liquids, microtexturing*