

АДАПТИВНИЙ РЕАКТОР КОРОННОГО РОЗРЯДУ ДЛЯ ОБРОБКИ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

¹Донбаська державна машинобудівна академія
²Вінницький національний технічний університет

Анотація: У роботі представлено конструкцію адаптивного імпульсного реактора коронного розряду, призначеного для рівномірної плазмової активації поверхонь при атмосферному тиску. Розроблено математичну модель процесу, що враховує розподіл електричного поля, кінетику іонізації та поверхневі реакції. Запропонована система поєднує високоевольтний імпульсний генератор, мультиелектродну матрицю та модуль автоматичного керування параметрами розряду в реальному часі. Експериментально встановлено підвищення поверхневої енергії полімерних матеріалів до 65–72 мН/м і зростання міцності адгезії покриттів у 2–3 рази порівняно з необробленими зразками. Нерівномірність обробки не перевищує 5 %. Технологія є перспективною для пакувальної, автомобільної, електронної та біомедичної галузей.

Ключові слова: коронний розряд, атмосферна плазма, активація поверхні, плазмова обробка, покращення адгезії, модифікація полімерів.

Abstract: The paper presents the design of an adaptive pulsed corona discharge reactor intended for uniform plasma surface activation at atmospheric pressure. A mathematical model of the process was developed taking into account electric field distribution, ionization kinetics, and surface reaction mechanisms. The proposed system combines a high-voltage pulsed generator, a multi-electrode array, and a real-time automatic discharge control module. Experimental results demonstrated an increase in the surface energy of polymer materials up to 65–72 mN/m and a 2–3 times improvement in coating adhesion strength compared with untreated samples. Treatment non-uniformity does not exceed 5%. The technology is promising for packaging, automotive, electronics, and biomedical industries..

Keywords: corona discharge, atmospheric plasma, surface activation, plasma treatment, adhesion improvement, polymer modification.

Вступ.

Стрімкий розвиток високотехнологічного виробництва, мікроелектроніки, пакувальної індустрії, біомедичних технологій та адитивного машинобудування висуває підвищені вимоги до функціональних властивостей поверхонь матеріалів. У сучасних технологічних системах саме поверхневий шар значною мірою визначає адгезійну здатність, змочуваність, біосумісність, зносостійкість, корозійну стійкість та довговічність виробів. Навіть за високих характеристик об'ємного матеріалу недостатній рівень поверхневої енергії або хімічної активності поверхні може суттєво обмежувати експлуатаційні можливості готової продукції. Тому керована модифікація поверхонь є одним із стратегічних напрямів сучасної інженерії матеріалів. Особливо актуальною ця проблема є для полімерних матеріалів, які широко застосовуються у транспортному машинобудуванні, електроніці, медицині, харчовій упаковці та побутовій техніці. Поліетилен, поліпропілен, фторополімери та низка композиційних полімерів характеризуються низькою поверхневою енергією, хімічною інертністю та слабкою здатністю до адгезійної взаємодії з лакофарбовими покриттями, клеями, металізаційними шарами й функціональними плівками. Унаслідок цього виникає потреба у попередній активації поверхні перед нанесенням покриттів або складанням виробів.

Традиційні методи підготовки поверхонь — механічне шорсткування, хімічне травлення, праймерні системи, вогнева обробка та вакуумно-плазмові процеси — часто супроводжуються значними енергетичними витратами, екологічними ризиками, багастадійністю технологічного циклу або складністю інтеграції у безперервні автоматизовані лінії. У зв'язку з цим особливий інтерес становлять низькотемпературні плазмові технології атмосферного тиску, які поєднують високу продуктивність, технологічну гнучкість та можливість безконтактного впливу на поверхню матеріалу. Серед різновидів атмосферної плазми важливе місце посідає коронний розряд, який є енергоєфективним, відносно простим у реалізації та придатним до масштабування для промислових застосувань. Плазмове середовище коронного розряду містить активні радикали, іони, електрони та збуджені частинки, здатні змінювати хімічний склад поверхневого шару, формувати полярні функціональні групи та

підвищувати поверхневу енергію матеріалу. Саме тому коронна обробка широко використовується у виробництві плівок, пакувальних матеріалів, полімерних деталей та електроізоляційних компонентів. Разом із тим класичні системи коронної обробки мають низку технічних обмежень: локальну нерівномірність електричного поля, нестабільність плазмової зони, деградацію електродів, обмежені можливості адаптації до різних матеріалів та ризик переходу корони у дуговий режим. Це зумовлює необхідність створення нових інтелектуалізованих плазмових систем із багатоканальним керуванням параметрами розряду, просторовим розподілом енергії та автоматичною адаптацією до властивостей оброблюваної поверхні. У цьому контексті перспективним напрямом є застосування адаптивних мультиелектродних реакторів імпульсного типу, здатних забезпечувати високу однорідність обробки, стабільність плазмоутворення та енергоефективність процесу. Саме розробці такого підходу, математичному моделюванню його фізичних процесів та експериментальній перевірці технологічної ефективності присвячена дана робота.

Поверхневий шар матеріалу визначає адгезійні, трибологічні та функціональні властивості виробу. Такі промислові матеріали, як поліетилен, поліпропілен та фторополімери, характеризуються низькою поверхневою енергією, що обмежує їх здатність до формування міцних з'єднань з покриттями та клеями [1, 2]. Традиційні методи поверхневої активації — хімічне травлення, вогнева обробка, вакуумна плазма — мають суттєві недоліки: високу вартість, необхідність вакуумного обладнання, екологічну небезпеку, складну інтеграцію з безперервними виробничими лініями [3].

Обробка атмосферною плазмою є перспективною альтернативою, оскільки дозволяє модифікувати хімію поверхні без вакуумного устаткування. Серед атмосферних плазмових технологій коронний розряд є найбільш енергоефективним і масштабованим методом для промислового застосування [4]. Коронний розряд виникає при докладанні високої напруги між несиметричними електродами; утворена плазма містить реакційно-здатні частинки: радикали кисню (O), озон (O₃), гідроксильні радикали (OH) та збуджені молекули азоту, які вводять полярні функціональні групи на поверхні [5].

Водночас традиційні системи коронної обробки мають такі обмеження: нерівномірний розподіл розряду, обмежені можливості керування хімією плазми, ерозія електродів, перехід корони в дуговий розряд [6]. Головною метою цієї роботи є розробка адаптивного імпульсного мультиелектродного реактора коронного розряду, який забезпечує підвищену стабільність плазми, рівномірність обробки та ефективне керування параметрами розряду.

Результати дослідження.

Запропонований реактор містить такі підсистеми: імпульсне високовольтне джерело живлення, мультиелектродну матрицю коронного розряду, діелектричний бар'єр, транспортну систему та модуль адаптивного керування. Електродна матриця складається з голчастих електродів із радіусом кривизни 50–200 мкм, відстанню між електродами 5–10 мм та зазором до підкладки 4–6 мм. Напруженість електричного поля поблизу вістря електрода описується співвідношенням

$$E = \frac{V}{r \cdot \ln(4d/r)},$$

де V — напруга, r — радіус електрода, d — відстань до підкладки. Критична напруженість поля іонізації повітря при атмосферному тиску становить $E_{\text{крит}} \approx 3 \times 10^6$ В/м.

Математична модель плазми ґрунтується на рівнянні Пуассона для розподілу електричного потенціалу, рівнянні дрейфово-дифузійного транспорту заряджених частинок та кінетичному рівнянні швидкості поверхневих реакцій $R = k \cdot C_{\text{plasma}} \cdot C_{\text{surface}}$. Імпульсний генератор забезпечує амплітуду напруги 20–30 кВ, частоту імпульсів 20–40 кГц та тривалість імпульсу 50–200 нс, що суттєво знижує ймовірність переходу в дуговий розряд при збереженні високої густини плазми [7].

Експериментальна перевірка проводилась на полімерних підкладках з поліетилену (ПЕ), поліпропілену (ПП) та поліетилентерефталату (ПЕТ). Поверхнева енергія вимірювалась методом контактного кута, міцність адгезії — методом відриву. Результати вимірювань поверхневої енергії зведено у табл. 1.

Коронна обробка забезпечила суттєве підвищення поверхневої енергії всіх досліджених матеріалів. Міцність адгезії покриттів збільшилась у 2–3 рази порівняно з необробленими зразками. Нерівномірність обробки становила менше 5% по всій поверхні підкладки.

Таблиця 1. Поверхнева енергія полімерних підкладок до та після коронної обробки

Матеріал	До обробки, мН/м	Після обробки, мН/м
ПЕ	32	68
ПП	30	65
ПЕТ	42	72

Порівняно з традиційними системами коронної обробки запропонований реактор забезпечує покращену стабільність плазми, вищу просторову рівномірність та знижене енергоспоживання [8].

Висновки.

У результаті проведених досліджень розроблено та апробовано адаптивний імпульсний мультиелектродний реактор коронного розряду для обробки поверхонь при атмосферному тиску. Побудовано математичну модель плазми коронного розряду, що описує розподіл електричного поля, транспорт заряджених частинок та кінетику поверхневих реакцій. Експериментально підтверджено підвищення поверхневої енергії полімерних підкладок (ПЕ, ПП, ПЕТ) до 65–72 мН/м, що на 60–70% перевищує вихідні значення. Міцність адгезії покриттів зросла у 2–3 рази при нерівномірності обробки менше 5%.

Імпульсний режим роботи генератора (20–30 кВ, 20–40 кГц, 50–200 нс) дозволяє суттєво знизити ймовірність дугових розрядів і ерозію електродів при збереженні високої густини плазми. Система адаптивного керування автоматично підлаштовує параметри розряду залежно від матеріалу підкладки. Запропонована технологія має перспективи впровадження у пакувальній, автомобільній, біомедичній та електронній промисловості. Подальші дослідження будуть спрямовані на оптимізацію геометрії електродів, плазмову діагностику та масштабні промислові випробування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Fridman A. Plasma Chemistry. Cambridge University Press, 2008. 978 p.
2. Lieberman M., Lichtenberg A. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. 2nd ed. Wiley-Interscience, 2005. 757 p.
3. Roth J. R. Industrial Plasma Engineering. Vol. 2. Bristol: IOP Publishing, 2001. 546 p.
4. Tendero C., Tixier C., Tristant P., Desmairon J., Leprince P. Atmospheric pressure plasmas: A review. Spectrochimica Acta Part B. 2006. Vol. 61, No. 1. P. 2–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2005.10.003>.
5. Strobel M., Lyons C. S. An essay on contact angle measurements. Plasma Processes and Polymers. 2011. Vol. 8, No. 1. P. 8–13. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppap.201000041>.
6. Kogelschatz U. Dielectric-barrier discharges: Their history, discharge physics, and industrial applications. Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2003. Vol. 23, No. 1. P. 1–46. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1022470901385>.
7. Laroussi M., Akan T. Arc-free atmospheric pressure cold plasma jets: A review. Plasma Processes and Polymers. 2007. Vol. 4, No. 9. P. 777–788. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppap.200700066>.
8. Sira M., Trunec D., Stahel P., Buršíková V., Navrátil Z., Buršík J. Surface modification of polyethylene and polypropylene in atmospheric pressure glow discharge. Journal of Physics D: Applied Physics. 2005. Vol. 38. P. 621–627. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/4/015>.

Ковалевський Сергій Вадимович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Інноваційних технологій і управління Донбаської державної машинобудівної академії, м.Краматорськ-Тернопіль, e-mail: kovalevskii61@gmail.com.

Жуківський Назар Сергійович – студент групи ІПМ23б, Факультет машинобудування та транспорту, Вінницький національний технічний університет

Kovalevskyy Sergiy Vadimovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Innovative Technologies and Management at the Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk-Ternopil, e-mail: kovalevskii61@gmail.com.

Zhukivskiy Nazar Serhiiovych – student of group IPM23b, Faculty of Mechanical Engineering and Transport, Vinnytsia National Technical University.