

УДК 678.026

Кравченко Олег

ТОВ «Технологія», Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЛАМІНУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ БАГАТОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ

Анотація. У роботі досліджено процес ламінування як ключовий етап формування багатошарових покриттів у промислових умовах. Запропоновано комплексний метод оптимізації режимів ламінування, що базується на системному підході та експериментальному варіюванні параметрів. У результаті визначено оптимальні діапазони технологічних режимів і отримано залежності між параметрами процесу та якісними показниками, що дозволило підвищити адгезійну міцність на 15–25% і зменшити кількість дефектів на 30–40%. Показано, що впровадження оптимізованих режимів забезпечує підвищення стабільності процесу та ефективності виробництва.

Ключові слова: ламінування, багатошарові покриття, адгезія, технологічні параметри.

Oleg Kravchenko

OPTIMIZATION OF LAMINATION PROCESS PARAMETERS TO IMPROVE THE QUALITY OF MULTILAYER COATINGS

Abstract. The paper investigates the lamination process as a key stage in the formation of multilayer coatings in industrial conditions. A comprehensive method for optimizing lamination modes is proposed, based on a systematic approach and experimental variation of parameters. As a result, the optimal ranges of technological modes are determined and the dependences between process parameters and quality indicators are obtained, which allowed to increase the adhesion strength by 15–25% and reduce the number of defects by 30–40%.

Keywords: lamination, multilayer coatings, adhesion, technological parameters.

Вступ

Процес ламінування є одним із ключових етапів виготовлення багатошарових матеріалів у пакувальній, поліграфічній та композитній промисловості. Його сутність полягає у з'єднанні декількох шарів матеріалів за рахунок дії температури, тиску та адгезійних властивостей клею. Якість багатошарових покриттів визначається міцністю адгезійного з'єднання, однорідністю структури та відсутністю дефектів (бульбашок, зморшок, деламінації). Водночас у промислових умовах (зокрема на лініях типу Duplex Combi Linear) забезпечення стабільної якості ускладнюється через багатofакторність процесу. У зв'язку з цим актуальним є завдання оптимізації параметрів процесу ламінування з метою підвищення якості готової продукції та зменшення кількості браку.

Огляд проблематики та існуючих методів вирішення

Процес ламінування багатошарових матеріалів характеризується складною багатofакторною природою, що зумовлює значні труднощі у забезпеченні стабільної якості продукції в промислових умовах [1]. Особливо це актуально для високошвидкісних ліній, де навіть незначні відхилення параметрів можуть призводити до суттєвого погіршення експлуатаційних характеристик покриття.

До основних факторів, що впливають на якість ламінування в технологічному процесі належать: температура нагрівальних валів, тиск у зоні контакту, швидкість руху полотна, товщина та рівномірність нанесення клею, властивості матеріалів (поверхнева енергія, шорсткість, хімічна сумісність). Взаємодія цих факторів є

нелінійною. Наприклад, підвищення температури зменшує в'язкість клею, що покращує змочування поверхні, однак надмірне нагрівання може призвести до деградації полімеру або утворення дефектів. Аналогічно, збільшення тиску підвищує адгезію, але може викликати деформацію тонких плівок.

Причини цих дефектів часто мають комплексний характер, що ускладнює їх усунення шляхом регулювання лише одного параметра. Існуючі методи вирішення включають: регулювання температурних режимів, багатоступеневе пресування, контроль часу витримки, оптимізацію товщини клею та швидкості нанесення. Сучасні підходи також передбачають використання методів статистичної оптимізації (метод Тагучі), що дозволяє визначити найбільш впливові параметри процесу [2].

Запропонований метод вирішення

У даній роботі запропоновано комплексний метод оптимізації параметрів процесу ламінування, який базується на системному підході до узгодження основних технологічних факторів з урахуванням їх взаємного впливу на якість багат шарового покриття.

На відміну від традиційних підходів, де параметри налаштовуються незалежно один від одного, запропонований метод передбачає їх одночасний аналіз та поетапну оптимізацію в умовах реального виробництва. Визначення ключових факторів впливу відіграє важливу роль і тому на першому етапі було визначено основні параметри, що мають найбільший вплив на якість ламінування зазначених вище. Додатково враховувались характеристики матеріалів (тип полімеру, товщина, поверхнева енергія). Для оцінки впливу параметрів було застосовано метод варіювання з побудовою експериментальної матриці. Кожен параметр змінювався у визначеному діапазоні: температура — у межах технологічно допустимих значень; швидкість — від мінімальної робочої до максимально допустимої; тиск — у межах, що не викликають деформації матеріалу; витрата клею — залежно від типу покриття.

Комбінації параметрів підбирались таким чином, щоб виявити як окремий вплив кожного фактору, так і їх взаємодію. Відповідно узгодження параметрів процесу на основі експериментальних даних було встановлено, що найбільш суттєвим є не окремий вплив параметрів, а їх взаємозалежність. Зокрема:

- температура та швидкість (при збільшенні швидкості лінії необхідне підвищення температури для забезпечення достатньої активації клею та змочування поверхні);

- тиск та товщина клею (недостатній тиск при малій товщині клею призводить до неповного контакту між шарами, тоді як надмірний тиск викликає витіснення клею та нерівномірність покриття);

- в'язкість клею та швидкість нанесення (зміна в'язкості впливає на рівномірність розподілу клею, що потребує коригування швидкості нанесення та параметрів дозування).

У зв'язку з цим було сформовано узгоджені режими роботи, які забезпечують стабільну якість при різних умовах, що відобразилось у алгоритмі оптимізації. Запропонований метод реалізується у вигляді послідовного алгоритму:

- 1 - встановлення базових параметрів (середні значення технологічного режиму);
- 2 - поступова зміна одного з параметрів із фіксацією інших;
- 3 - оцінка якості ламінату за показниками:
 - адгезії (міцність з'єднання);
 - наявності візуальних дефектів;
 - рівномірності покриття;
- 4 - коригування суміжних параметрів з урахуванням отриманих результатів;

5 - визначення оптимальної комбінації параметрів.

Запропонований метод був апробований в умовах промислового ламінування рулонних матеріалів на установці Machine Duplex Combi Linear L1300 [3]. Його впровадження не потребує додаткового обладнання, а базується на оптимальному налаштуванні існуючих технологічних параметрів. Практична цінність методу полягає у можливості: швидкої адаптації до зміни матеріалів; зменшення впливу людського фактора; стандартизації режимів роботи обладнання.

Результати дослідження та ефективність

У результаті аналізу встановлено, що підвищення температури ламінування призводить до зростання адгезійної міцності, збільшення тиску в свою чергу покращує контакт між шарами та зменшує кількість дефектів. Встановлено також, що оптимальне поєднання параметрів дозволяє підвищити міцність з'єднання на 15–25%, зменшити кількість дефектів і забезпечити стабільність якості продукції. Отримані результати узгоджуються з сучасними дослідженнями у сфері ламінування, які підтверджують критичний вплив температури, тиску та швидкості на адгезійні властивості матеріалів (рисунок 1).

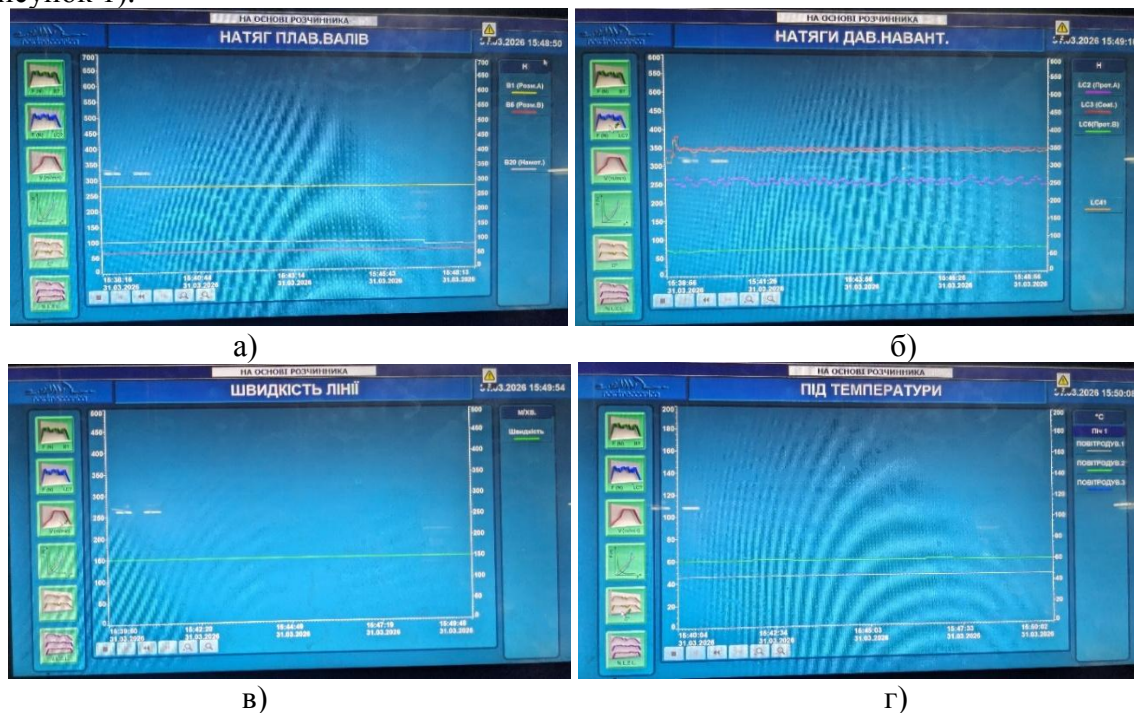


Рис. 1. Графіки залежностей основних технологічних параметрів на лінії Duplex Combi Linear L1300: а), б) – залежність натягу (тиску), в) – залежності швидкості процесу ламінування, г) – залежність температури.

Вплив температури на якість ламінування є досить значною. Було встановлено, що температура ламінувальних валів є одним із визначальних факторів формування адгезійного з'єднання. При температурі нижче 60 °С спостерігалось недостатнє змочування поверхні, що призводило до зниження адгезії та появи локальних зон деламінації. У діапазоні 70–85 °С забезпечувалась оптимальна активація клею, рівномірний розподіл та максимальна міцність з'єднання. При перевищенні 90 °С фіксувались ознаки перегріву: зниження в'язкості клею, його витіснення із зони контакту та поява дефектів типу «сухих зон». У результаті було визначено оптимальний температурний діапазон, який забезпечує стабільну якість покриття без перевитрат енергії.

Вплив швидкості лінії в процесі дослідження показали суттєву залежність якості ламінування від швидкості руху полотна, а саме: при швидкості до 120 м/хв забезпечується достатній час контакту для формування адгезійного зв'язку, проте знижується продуктивність; у діапазоні 130–180 м/хв досягається оптимальний баланс між якістю та продуктивністю; фольга для прикладу (9 – 12 мкр) на швидкості 200 - 350 м/хв формує оптимальне нанесення адгезивів, що напряду впливає на покращення зовнішнього вигляду. Встановлено, що підвищення швидкості потребує відповідного коригування температури та тиску.

Дослідження впливу тиску в зоні ламінування визначає ступінь контакту між шарами матеріалу та рівномірність розподілу клею. При недостатньому тиску (< 2 бар) спостерігається неповне прилягання шарів і наявність повітряних включень. Оптимальний діапазон (2,5–4 бар) забезпечує рівномірне з'єднання без деформації матеріалу. Надмірний тиск (> 5 бар) призводить до витіснення клею та утворення нерівномірного шару.

Експериментально встановлено, що вплив товщини клеєвого шару нанесення суттєво впливає на якість покриття. При недостатній витраті ($< 1,5$ г/м²) виникають зони неповного склеювання. Оптимальне значення (2–3 г/м²) забезпечує рівномірну адгезію. Надлишок клею ($> 3,5$ г/м²) сприяє утворенню бульбашок та збільшенню часу полімеризації.

Висновки

У результаті проведеного дослідження процесу ламінування багатошарових покриттів у промислових умовах отримано практичні результати відображенні в данній статті. Підтверджено визначальну роль технологічних параметрів процесу ламінування у формуванні якісних характеристик багатошарових покриттів. Доведено, що температура, тиск, швидкість руху полотна та товщина клеєвого шару безпосередньо впливають на адгезійну міцність, однорідність структури та відсутність дефектів.

Розроблено та апробовано комплексний метод оптимізації параметрів ламінування, що базується на поетапному варіюванні факторів і врахуванні їх взаємного впливу. Запропонований підхід дозволяє системно підбирати режими роботи обладнання без необхідності значних додаткових витрат.

Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості їх застосування для налаштування промислових ламінувальних установок (Machine Duplex Combi Linear L1300), адаптації технології до різних типів матеріалів та підвищення стабільності виробництва.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні узагальнених закономірностей впливу сукупності технологічних параметрів на якість багатошарових покриттів та обґрунтуванні необхідності їх комплексної оптимізації в єдиній системі керування технологічним процесом.

Перелік посилань

1. Мовчан А.П. Навчальний посібник: Методи статичної оптимізації. Навч. посіб. / Мовчан А.П., Степанець О.В. — К.: НТУУ «КПІ», 2012. — 138 с.
2. Промислова установка ламінування Duplex Combi Linear L1300 [<https://www.nordmeccanica.com/products/combi-solutions/duplex-combi-linear>]. – Режим доступу: URL – Дата звернення: 20.04.2026р.
3. Маджид, И.; Ахмад Найик, Г.; Мохаммад Дар, С.; Нанда, В. Новые технологии упаковки пищевых продуктов: инновации и перспективы на будущее. Журнал Саудовского общества сельскохозяйственных наук, 2018, 17, 454–462.