

УДК 686.1.027

DOI: 10.20535/2077-7264.3(81).2023.295442

© **О. О. Палюх**, д-р техн. наук, проф., **В. О. Воробей**, асп.,
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ ІНТЕГРАЛЬНИХ ОБКЛАДИНОК

В роботі досліджуються різні аспекти імітаційного моделювання, включаючи вибір матеріалів, методи обробки та конструктивні особливості обкладинок, з акцентом на зниження споживання ресурсів та підвищення екологічної ефективності виробництва.

Ключові слова: імітаційне моделювання; міцність інтегральних обкладинок; аналітичні дослідження; ресурсоощадні технології; екологічна стійкість.

Вступ

У сучасному науково-технічному середовищі, де акцент на інноваційні підходи та оптимізацію виробничих процесів стає все більш помітним, дослідження та розробка ефективних методів імітаційного моделювання набуває особливої значущості. Це особливо актуально в контексті виробництва інтегральних обкладинок для книг, які є не лише культурною цінністю, а й важливим елементом матеріальної спадщини. У цій статті наголошується на створенні ресурсоощадних інтегральних обкладинок, що поєднують у собі естетичні та екологічні аспекти.

Значну частину дослідження присвячено аналізу інноваційних методів приклеювання клапанів до основної частини обкладинок, використовуючи ПВА дисперсії. Вивчаються три ключові методи

приклеювання: точковий, лінійний та шаблонний, кожен із яких вносить свою частку у підвищення технологічної ефективності та скорочення витрачання ресурсів, роблячи їх перспективними для застосування в сучасній друкарській індустрії. Точковий метод виділяється економічністю та точністю, зменшуючи екологічне навантаження та матеріальні витрати, тоді як лінійний метод забезпечує міцне з'єднання внаслідок рівномірного розподілу клею, що підходить для видань більших форматів. Шаблонний метод поєднує переваги обох попередніх підходів, пропонуючи універсальне рішення для різноманітних типів книг.

Метою цієї статті є не лише демонстрація ефективності цих методів, а і їхня значущість у контексті сучасних вимог до ресурсоощадження та екологічної відпові-



дальності у видавничій індустрії. У цьому контексті особлива увага приділяється дослідженню процесів розрахунку міцності інтегральних обкладинок, відповідального аспекту для забезпечення їхньої довговічності та функціональності. Цей підхід не тільки покращує якість та надійність кінцевого продукту, а й сприяє розвитку технологій друкарства відповідно до вимог сталого розвитку та ефективного використання ресурсів.

Імітаційне моделювання є сучасним інструментом для оптимізації виробничих процесів. Метод дозволяє сформулювати передбачення поведінки матеріалів та виробів у різноманітних умовах експлуатації, що відкриває нові перспективи для підвищення надійності та довговічності інтегральних обкладинок.

Постановка проблеми

Виготовлення ресурсоощадних інтегральних обкладинок з хром-ерзацу, подвійна клеєна структура яких утворюється з використанням ПВА дисперсій, є багатоаспектним процесом, що вимагає прикладного теоретичного обґрунтування та застосування отриманих результатів у практичній площині. Основні етапи цього процесу включають комплексне дослідження взаємозв'язків між хімічним складом, структурою і властивостями використовуваних матеріалів, аналіз фізичних та механічних властивостей хром-ерзацу, таких як його міцність, гнучкість та адгезійні характеристики, що мають вагоме значення для гарантії якості та тривалості використання кінцевого продукту. Також важливим є аналіз суміс-

ності хром-ерзацу з ПВА дисперсіями, щоб забезпечити ефективне та надійне склеювання різних елементів обкладинок.

Для оптимізації процесу склеювання необхідно виконати розрахунки, спрямовані на визначення розподілу напружень у місцях склеювання. Це допомагає у виборі оптимальних зон застосування клею, що забезпечує рівномірний розподіл навантажень і запобігає розшаруванням, підвищуючи тим самим міцність і довговічність обкладинок.

Крім того, дослідження властивостей ПВА дисперсій, включаючи їх в'язкість, тимчасові характеристики затвердіння та адгезійні властивості, є суттєвим для розуміння хімії та фізики полімерів, які застосовуються у процесах виробництва інтегральних обкладинок. Такий підхід дозволяє не лише оптимізувати процес виробництва, а й гарантувати високу якість готової продукції.

Для досягнення синергії між цілями ресурсоощадності у виробництві інтегральних обкладинок та забезпечення довговічності клеєних з'єднань, важливо знайти оптимальний баланс між методикою нанесення клею та ефективним управлінням напруженнями у клеєній структурі обкладинок. У цьому контексті для мінімізації витрати матеріалів ключовим аспектом є оптимізація способу нанесення клею, що впливає з аналізу його впливу на розподіл напружень (рис. 1).

Наприклад, точкове нанесення може бути ефективним для зменшення кількості застосованого клею (чинник ресурсоощадності), але може бути менш вдалим у рівномірному розподілі

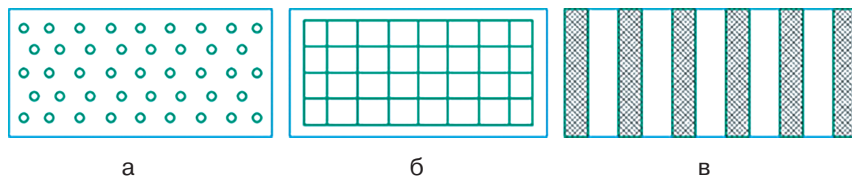
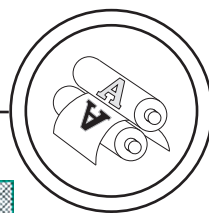


Рис. 1. Вибірка способів дискретного нанесення клею на клапани інтегральних обкладинок: а — точковий, б — лінійний, в — стрічковий

експлуатаційних навантажень. Лінійний метод нанесення клею може сприяти більш рівномірному розподілу напружень, ніж точкове нанесення, зберігаючи при цьому ресурсощадний ефект. Крім того, розробка стратегії розміщення клейових точок або ліній повинна бути націлена на мінімізацію зон з високою концентрацією напружень. Це може включати оптимізацію відстаней між точками або лініями клею, щоб забезпечити більш ефективний і рівномірний розподіл навантаження по склеєній структурі.

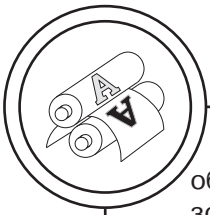
Проведення математичного моделювання та чисельного аналізу для визначення найкращого розподілу клею стає невіддільною частиною процесу, який включає оцінку впливу різних методів нанесення клею на розподіл напружень у склеєних сполуках. Крім того, інноваційні конструктивні рішення, такі як використання додаткових підсилювачів або модифікація конструкції обкладинки, можуть ефективно компенсувати локальні зони підвищених напружень.

Таким чином, процеси імітаційного моделювання для розрахунку міцності інтегральних обкладинок, які інтегрують ресурсощадні техніки з детальним урахуванням специфіки застосування клейових матеріалів та аналізу динаміки на-

пружень у склеєних структурах, займають провідне місце в сучасних наукових дослідженнях. Використання цих передових методів дозволяє не лише забезпечити економію ресурсів, але й підвищити якість інтегральних обкладинок, гарантуючи їхню довговічність та високу надійність, що є особливо важливим для довготривалого використання в галузі книговидавництва. Цей комплексний підхід сприяє створенню продукції, яка задовольняє як вимоги сталого розвитку, так і потреби кінцевих споживачів.

Аналіз попередніх досліджень

Прогрес у галузі технологій склеювання та поліграфічного виробництва сприяв вдосконаленню методів нанесення клею, особливо в аспектах дискретного нанесення клею для книжково-журнальних обкладинок. Це дозволило більш глибоко вивчити фізико-хімічні властивості клеїв та їхній вплив на міцність склеєних матеріалів, зокрема на залежність між характеристиками поверхні матеріалу (наприклад, пористість і шорсткість) і ефективністю склеювання. Важливим аспектом цих досліджень стало вивчення взаємодії клею з різними типами паперу та картону, що використовуються у виробництві



обкладинок, та розробка оптимізованих схем нанесення клею, які забезпечують максимальну міцність при мінімальному споживанні клею.

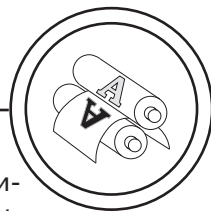
Дослідження [1] підтвердили, що ефективність мінімізації використання клейових полімерних композицій при виготовленні інтегральних книжково-журнальних обкладинок може бути досягнута за допомогою дискретного нанесення клею. Зокрема, використання суцільного, стрічкового методу з повздовжнім чи поперечним напрямом, а також коміркового шахового методу, демонструє різні ступені міцності обкладинок, що корелюють із геометричною площею заповнення клеєм. Порівняння міцності склеєних фрагментів інтегральних обкладинок виявило, що відмінності в способах склеювання розгортки таких обкладинок мають значний вплив на показники міцності. Це підтверджує, що міцність склеювання залежить не тільки від площі заповнення поверхонь клеєм, але й від конфігурації самого нанесення клею.

У роботі [2] описано новітні методи екологічно ефективного та стійкого виробництва книжкових обкладинок, з акцентом на розробці та впровадженні оптимальних технологічних рішень. В центрі уваги знаходяться сучасні клейові системи, які вирізняються не тільки своєю екологічною безпечністю, але й високою продуктивністю. Дослідження включає комплексну оцінку різноманітних методів та технологій, аналізуючи їхній вплив на довкілля та виробничі характеристики, аби досягти стандартів сталості та якості у виробництві обкладинок. Однак, в ро-

боті не зосереджено увагу на аналізі міцності склеєних композитних матеріалів, що є важливим аспектом при оцінці якості кінцевого продукту.

Автори статті [3] детально описують розвиток та використання клеїв у паперовій та пакувальній промисловості. Вони підкреслюють ключову роль клеїв у забезпеченні структури та цілісності паперових та картонних пакувань, особливо важливу в контексті споживчого використання. В статті розглядаються різноманітні типи клеїв, використовуваних у галузі, зокрема синтетичні та біополімерні клеї на водній основі. З усім тим, автори зазначають, що аналіз різних типів клеїв поки що не надає вичерпної інформації щодо тенденцій у міцності склеєних паперових структур, вказуючи на потребу подальших досліджень у цій області.

Метою наступної роботи [4] є всебічне дослідження полімерної адгезії як складного мультидисциплінарного явища, що об'єднує зусилля в областях хімії, фізики та інженерії. Автори здійснили глибокий огляд основних концепцій, які формуються у сфері полімерної адгезії, розкриваючи основні вимоги в теорії та моделюванні цього явища. Особлива увага приділена експериментальним методам для точного вимірювання адгезійних сил та характеристик поверхонь на молекулярному рівні, що дозволяє зрозуміти динаміку та механізми взаємодії на різних масштабах. Проте одним з ключових напрямів для подальших досліджень може бути вивчення взаємодії полімерних адгезійних матеріалів з різними типами поверхонь. Це включає



детальне дослідження як мікроскопічних (молекулярних), так і макроскопічних (структурних) властивостей поверхонь, до яких застосовуються полімерні адгезиви.

Розвиток концепцій з дослідження попереднього склеювання деталей із гнучких матеріалів за допомогою полімерних клейових композицій детально висвітлено у роботі [5]. У цій роботі демонструється ефективність зонального нанесення клею та наголошується на критичній важливості точного визначення міцності клейових з'єднань. Це особливо актуально, оскільки будь-яке відносне зміщення деталей може призвести до порушення цілісності та руйнування клейового з'єднання, що має значення для якості кінцевого продукту. Проте, в роботі не досліджено вплив різних видів полімерних клейових матеріалів на тривалість і надійність склеювання.

У ході дослідження [6], спрямованого на вивчення впливу властивостей паперу на міцність склеювання, встановлено, що шорсткість поверхні паперу не має значущого впливу на міцність склеювання. З іншого боку, за допомогою ультразвукового вимірювання проникнення клею в поверхневу структуру паперу (ULP) виявлено значну кореляцію між швидкістю проникнення клею та міцністю склеювання, всупереч тому, що фактичне поглинання клею під час склеювання має лише помірний зв'язок з міцністю. Ці результати підкреслюють важливість синергії різних чинників, таких як змочування поверхні паперу та його набрякання, яке визначає здатність паперу поглинати вологу або клей. Ця властивість

паперового субстрату є важливою для ефективності склеювання, оскільки вона безпосередньо впливає на міцність та стійкість клеєного з'єднання.

Дослідження, представлене у статті [7], зосереджено на розробці нових видів багатошарового паперу та картону, що включають хімічні волокна та вторсировину з поліграфічного виробництва. Це спрямовано на створення високоякісного паперу та картону, який може бути ефективно використаний у поліграфічній промисловості, щоб зменшити споживання цінної бавовняної целюлози. Однак стаття не визначає оптимальних пропорцій для комбінування вторсировинних волокон та целюлози у виготовленні багатошарового композитного паперу та картону, які можуть бути використані для виробництва книжкових оправа.

Для подолання цієї проблеми в роботі [8] розроблено методику оптимізації виробництва картону, яка інтегрує технологічні змінні за допомогою безперервного моніторингу та аналізу ключових параметрів процесу, що впливають на якість продукції. Введення нового алгоритму керування процесом виробництва дозволяє адаптувати виробничі умови відповідно до мінливих характеристик картону, забезпечуючи підвищення якості кінцевого продукту. Проте важливо зазначити, що в цій роботі не представлено алгоритмів забезпечення властивостей картону, які б зробили його придатним для формування композитних клеєних структур з високими показниками міцності.

Опис можливостей використання вторинних паперових матеріалів



для виготовлення книжкових обкладинок наведено у роботі [9], де дослідження фокусується на створенні екологічно чистих продуктів із переробленого паперу. Аналіз цих матеріалів виявив, що вони мають покращені характеристики порівняно з традиційно використовуваними, зокрема, вищий вміст целюлози (45,80 %), пентозанів (25,90 %) та лігніну (22,60 %). Це дослідження спрямовано на розробку дизайну продукції, з використанням вторсировинних матеріалів, а також оцінку їх вартості та потенціалу для створення екологічно стійких та ефективних книжкових обкладинок.

У статті [10] розглядається модель для аналізу напружень у подвійних клейових з'єднаннях, яка фокусується на вивченні впливу жорсткості склеюваних матеріалів на розподіл напружень у шарі клею. Зокрема, встановлено, що склеювання матеріалів з різними рівнями жорсткості може спричинити концентрацію напружень і, як наслідок, руйнування в менш жорсткому матеріалі. У дослідженні представлено інноваційну концепцію зміцнення менш жорсткого компонента, що дозволяє знизити пікові напруження в клейовому шарі. Однак відсутнє оцінювання тривалої стійкості та надійності подвійних клейових з'єднань в різних умовах експлуатації.

Таким чином, актуальним є дослідження, спрямоване на поліпшення структурної цілісності та довговічності інтегральних обкладинок, що має істотне значення для книжкового виробництва. Важливим аспектом яких є застосування імітаційного моделю-

вання для аналізу міцності обкладинок, що дозволяє прогнозувати тривалість споживчого використання в різних умовах та оптимізувати використання клеєних матеріалів. Такий підхід відкриває шлях до розробки та впровадження більш продуктивних і надійних методів виготовлення обкладинок, враховуючи матеріальні та технологічні вимоги. Впровадження цих нововведень не лише підвищить якість та тривалість використання готових книг, але й сприятиме економічній та екологічній ефективності виробництва, забезпечуючи сталість та відповідальність у використанні ресурсів.

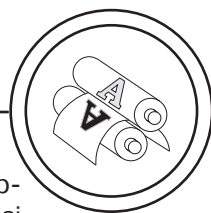
Мета роботи

Розробка та аналіз процесів імітаційного моделювання для розрахунку міцності інтегральних обкладинок. Основна задача полягає в ідентифікації оптимальних параметрів нанесення клею та управління розподілом напружень у склеєних структурах, що в кінцевому підсумку сприятиме підвищенню довговічності та надійності інтегральних обкладинок. Для досягнення цієї мети дослідження передбачає вирішення наступних завдань:

— розробити та проаналізувати методи імітаційного моделювання, які дозволяють прогнозувати розподіл напружень в інтегральних обкладинках.

— дослідити взаємозв'язки між різними типами палітурних якими як точкове, лінійне, шаблонне та їх впливом на міцність склеєних композитних структур у конструкціях інтегральних обкладинок;

— розробити рекомендації з оптимізації процесів вироб-



ництва інтегральних обкладинок, що забезпечують максимальну міцність і довговічність продукції.

Результати проведених досліджень

Розробка імітаційного моделювання теорії розрахунку міцності клеєних дискретним способом (точковим, лінійним, шаблонним) інтегральних обкладинок вимагає комплексного підходу, що включає аспекти механіки матеріалів, хімії клеїв і фізики поверхні. Основою такої теорії є визначення характеристик матеріалів обкладинки, таких як хром-ерзац, і дослідження їх механічних властивостей, включаючи модуль пружності, межу міцності на розрив і пластичність.

Крім того, необхідно оцінити адгезійну міцність клейового матеріалу (ПВА дисперсія), його час затвердіння, а також термічну та хімічну стійкість. Ці дані використовуються для розрахунку розподілу напружень і деформацій.

У практичних умовах розподіл напружень у клеєних сполуках часто виявляється неоднорідним через чинники, такі як шорсткість поверхні, нерівномірність нанесення клею та інших варіабельних умов процесу склеювання. Застосування методів кінцевих елементів дозволяє візуалізувати та кількісно оцінити розподіл напружень у місцях склеювання за допомогою комп'ютерного моделювання.

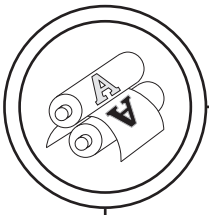
Для аналізу дискретного способу склеювання конструктивних деталей інтегральних обкладинок важливо зробити розрахунок сили зчеплення для точкового способу нанесення клею в кожній точці та визначити оптимальну від-

стань між точками для рівномірного розподілу напружень. У разі лінійного способу слід провести аналіз напружень уздовж лінії склеювання та визначити оптимальну ширину та розташування ліній. Для шаблонного способу необхідно розробити шаблони клейового з'єднання, що максимізують міцність обкладинок при мінімальному використанні клею.

Врахування впливу експлуатаційних чинників містить аналіз температурних впливів на міцність клейової сполуки, а також оцінку стійкості клею до вологості та хімічних речовин. Експериментальна перевірка та оптимізація теорії передбачають лабораторні випробування, під час яких проводяться тести на розрив, вигин та зсув для оцінки міцності клейових сполук конструктивних деталей інтегральних обкладинок та зіставлення отриманих результатів з теоретичними розрахунками.

На основі результатів випробувань проводиться ітераційна оптимізація та коригування параметрів клейової сполуки для досягнення оптимальної міцності. Розроблена імітаційна модель теорії розрахунку повинна забезпечувати комплексне розуміння взаємодії матеріалів обкладинки та клею, а також сприяти оптимізації виробничого процесу.

Визначення адгезійної міцності клею та розрахунок сили зчеплення клейової сполуки містить аналіз зсувної та відривної міцності. Диференціальні рівняння цих розрахунків ґрунтуються на фізичних принципах механіки деформованого твердого тіла. У разі зсуву сила зчеплення F_s може бути розрахована за формулою:



$$\tau = \frac{F_s}{A}, \quad (1)$$

де τ — напруження зсуву (Па); F_s — сила зсуву (Н); A — площа поверхні, що склеюється (m^2).

Диференціальне рівняння для зсуву, що враховує розподіл напруги площею, може бути виражено як:

$$\frac{d\tau}{dA} = \frac{dF_s}{dA}. \quad (2)$$

Для відривної міцності, сила зчеплення F_o визначається як:

$$\sigma = \frac{F_o}{A}, \quad (3)$$

де σ — нормальне напруження (Па); F_o — сила відриву (Н); A — площа докладання сили (m^2).

Відповідне диференціальне рівняння для відриву:

$$\frac{d\sigma}{dA} = \frac{dF_o}{dA}. \quad (4)$$

Для розрахунку ефективної площі контакту між клеєм і матеріалом обкладинки важливо врахувати, що це завдання зазвичай вирішується за допомогою експериментальних методів, так як реальний розподіл клею і його взаємодія з поверхнею можуть бути дуже складними для точного математичного опису. Проте, для імітаційного моделювання розрахунків запропоновано спрощений теоретичний підхід.

Якщо припустити, що клей нанесено рівномірно і поверхня обкладинки ідеально рівна, тоді дискретна (ефективна) площа контакту може бути апроксимована як площа реального фізичного

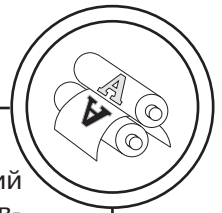
контакту між клеєм і обкладинкою. Припустимо, що A_{Σ} — загальна площа, доступна для склеювання, а A_d — дискретна (ефективна) площа контакту. Якщо ми розглядаємо зміну дискретної (ефективної) площі контакту A_d залежно від будь-якого параметра, наприклад, товщини шару клею t , можна записати наступне диференціальне рівняння:

$$\frac{dA_d}{dt} = f(t, \text{інші_параметри}). \quad (5)$$

Тут $f(t, \text{інші_параметри})$ — це функція, яка описує, як зміна товщини шару клею впливає на ефективну площу контакту. Ця функція залежатиме від властивостей клею (наприклад, його в'язкості) та поверхні матеріалу обкладинки. Щоб знайти ефективну площу контакту, це диференціальне рівняння потрібно інтегрувати з урахуванням граничних умов, які можуть містити початкову товщину шару клею та початкову ефективну площу контакту, (наприклад при $t = t_d$, $A_d = A_o$)

$$A_d(t) = A_o + \int_{t_d}^t f(t', \text{інші_параметри}) dt'. \quad (6)$$

На практиці для вирішення цього завдання зазвичай використовуються експериментальні методи, такі як вимірювання сили зчеплення при різній товщині клею шару, щоб визначити, яка товщина забезпечує максимальну ефективну площу контакту. Це пов'язано з тим, що реальний розподіл клею може бути нерівномірним через текстуру поверхні матеріалу, повітряних бульбашок та інших чинників, що ускладнює теоретичні розрахунки.



Розрахунок зміни міцності композитної структури, утвореної шляхом склеювання двох конструктивних деталей інтегральних обкладинок з хром-ерзацу, може бути складним, оскільки він залежить від різних чинників, таких як властивості матеріалів, якість склеювання, розподіл клею, і навантаження, якому буде піддаватися композит.

Позначимо F_1 та F_2 міцність кожної конструктивної деталі інтегральної обкладинки з хром-ерзацу окремо, а C — міцність клею. Тоді загальна міцність композиту M може бути розрахована як функція від цих величин, а також від площі склеювання S і відсотка площі, покритої клеєм p (де 100% означає суцільний шар клею, а менші значення відповідають окремим ділянкам). Загальна формула, яка враховує ці чинники:

$$M = f(F_1, F_2, B, C, S, p). \quad (7)$$

Ця функція може містити такі аспекти, як:

Середня міцність матеріалів:

$$M_1 = \frac{F_1 + F_2}{2}. \quad (8)$$

Вплив міцності клею:

$$M_2 = C \times \frac{p}{100}. \quad (9)$$

Корекція на площу склеювання:

$$M_3 = S \times K_s, \quad (10)$$

де K_s — коефіцієнт площі ділянок з клеєм.

Формулу загальної міцності M представлено, як комбінацію наведених чинників:

$$M = M_1 \times (1 + M_2) \times M_3. \quad (11)$$

Це спрощений узагальнений приклад, який виокремлює основні умови зміни міцності композитної структури, утвореної шляхом склеювання двох конструктивних деталей інтегральної обкладинки з хром-ерзацу. Основною змінною умовою для такого розрахунку є відсоток заповнення адгезивом дотичних площин склеювання. Для вдосконалення формули з метою її практичного застосування в ресурсоощадних технологіях виготовлення поліграфічної продукції, необхідно врахувати такі елементи, як розподіл напружень, тип і властивості клею, умови навколишнього середовища, методи нанесення клею тощо. Розглянемо наступні додаткові параметри для розрахунку:

— Коефіцієнт розподілу напружень K_{st} , який враховує неоднорідність розподілу напружень залежно від способу склеювання;

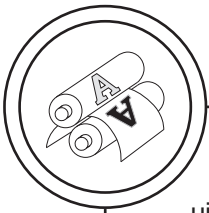
— Коефіцієнт властивостей клею K_{gl} , який враховує такі чинники, як адгезія, в'язкість, термічна стабільність;

— Коефіцієнт умов навколишнього середовища K_{en} , який враховує вплив температури, вологості, UV випромінювання тощо;

— Коефіцієнт методу нанесення клею K_{met} , який враховує рівномірність та якість нанесення клею.

Удосконалена формула розрахунку загальної міцності клеєних інтегральних обкладинок, з врахуванням додаткових параметрів:

$$M = \left(\frac{F_1 + F_2}{2} \right) \times \left(1 + C \times \frac{p}{100} \times K_{gl} \right) \times S \times K_{st} \times K_{en} \times K_{met}. \quad (12)$$



Ця формула враховує основні механічні властивості конструктивних деталей обкладинок та клею, а також додаткові чинники, що впливають на загальну міцність клеєної структури. Однак, важливо розуміти, що для точного розрахунку всі коефіцієнти та параметри повинні бути визначені на основі експериментальних даних та специфікацій матеріалів.

Розглянемо окремо коефіцієнт розподілу напружень у процесі склеювання матеріалів інтегральних обкладинок, який є суттєвим чинником у забезпеченні надійності та тривалості з'єднань. Цей параметр відображає, як напруження розподіляється у місцях, де матеріали склеєні разом, і є важливим, оскільки різні методи та властивості склеювання мають прямий вплив на спосіб передачі навантаження між двома матеріалами. Неоднорідність у розподілі напружень виникає з різних причин, особливо через нерівномірне нанесення клею або відмінності у властивостях поверхонь, що склеюються.

Одним з важливих аспектів у цьому процесі є вибір методу

склеювання. Суцільне та точкове нанесення клею мають різний вплив на розподіл напружень. Суцільне нанесення забезпечує більш рівномірний розподіл, тоді як точкове може створювати локальні зони з підвищеними концентраціями напружень, що може стати причиною нетривалості з'єднання.

Аспекти, такі як в'язкість, еластичність та адгезивні властивості клею, роблять свій внесок у цей процес, впливаючи на здатність клею рівномірно розподілятися та утворювати міцне з'єднання. Також значущою є геометрія з'єднаної поверхні — конструктивні особливості розгортки різних типів та відповідно до них обрані способи склеювання інтегральних обкладинок, оскільки разом вони визначають розподіл навантажень та напружень у клеєному з'єднанні (рис. 2).

Неоднорідний розподіл напружень може призводити до раннього відшарування або розтріскування в місцях з високою концентрацією напружень, тому рівномірний розподіл є важливим для підвищення загальної міцності та довговічності клеєного з'єднання.

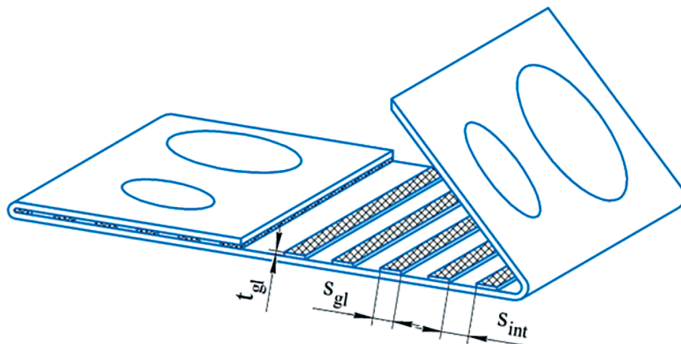
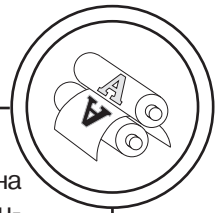


Рис. 2. Стрічкове нанесення клею для створення композитної структури інтегральної обкладинки, t_{gl} — товщина клейового шару, s_{gl} — розрахункова ширина клейової стрічки, s_{int} — розрахунковий інтервал



Коефіцієнт розподілу напружень у математичній моделі склеювання використовується як інструмент для коректування розрахунків міцності, враховуючи ці неоднорідності.

Він може бути визначений емпірично через випробування або за допомогою детального аналізу напружень у з'єднанні, зазвичай з використанням методів чисельного моделювання, таких як метод скінченних елементів (МСЕ). Цей підхід допомагає зрозуміти вплив різних параметрів склеювання на загальну міцність з'єднання, сприяючи оптимізації конструкційних рішень.

Формулювання рівняння для опису неоднорідного розподілу напружень під час процесу приклеювання клапанів розгортки інтегральної обкладинки, виготовленої з хром-ерзацу вимагає розгляду ряду чинників, включаючи механічні властивості хром-ерзацу, властивості клею, метод нанесення клею (точковий або лінійний), а також геометрію обкладинки і клапанів.

Однак, можна наблизити цей процес, використовуючи деякі спрощення. Наприклад, можна розглянути розподіл напружень у виді диференційного рівняння, яке описує зміну напружень залежно від відстані від краю приклеєного клапана. При цьому можна припустити, що напруження залежать від модуля Юнга матеріалу обкладинки та властивостей клею.

Припустимо, E — модуль Юнга матеріалу обкладинки, $\sigma(x, y)$ — розподіл напружень в обкладинці, G — модуль зсуву клею, h — товщина клеєного шару. Тоді, враховуючи, що напруження залежать

від відстані до краю клапана, можна сформулювати наступне диференційне рівняння:

$$\frac{\partial^2 \sigma(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma(x, y)}{\partial y^2} = -\frac{G}{Eh} \sigma(x, y). \quad (13)$$

Це лінійне, однорідне, часткове диференційне рівняння другого порядку. Його можна розв'язати за допомогою методу розділення змінних, припускаючи, що розв'язок може бути представлений у виді добутку двох функцій, кожна з яких залежить лише від однієї змінної:

$$\sigma(x, y) = X(x)Y(y). \quad (14)$$

Підставляючи це у рівняння і ділячи на $X(x)Y(y)$, отримуємо:

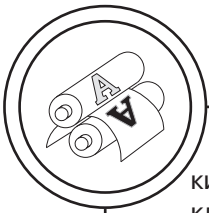
$$\frac{1}{X(x)} \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} + \frac{1}{Y(y)} \frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2} - \frac{G}{Eh} = 0. \quad (15)$$

Оскільки ліва сторона рівняння залежить лише від x , а права — лише від y , кожна сторона повинна бути рівною константі. Позначимо цю константу як λ . Тоді отримуємо два диференційні рівняння:

$$\frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} = \lambda X(x), \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2} = \left(-\frac{G}{Eh} - \lambda \right) Y(y). \quad (17)$$

Кожне з цих рівнянь може бути розв'язано окремо. Розв'язки будуть залежати від граничних умов задачі. Наприклад, якщо ми припускаємо, що на краях обкладин-



ки напруження відсутнє або обкладинка не зазнає деформації в цих точках, то граничні умови можуть виглядати як:

$$X(0) = X(L_x) = 0, \quad (18)$$

$$Y(0) = Y(L_y) = 0, \quad (19)$$

де L_x і L_y — розміри обкладинки в напрямках x і y відповідно.

Ці рівняння ведуть до тригонометричних або експоненційних функцій для $X(x)$ і $Y(y)$, залежно від значення λ і параметрів G , E , і h , оскільки це типово для задач з обмеженими граничними умовами.

Для $X(x)$:

$$X(x) = A \sin(\sqrt{\lambda}x) + B \cos(\sqrt{\lambda}x), \quad (20)$$

де A та B — константи, які можуть бути визначені з граничних умов. Аналогічний розв'язок для $Y(y)$ має схожий вид.

Комбінація цих функцій дає загальний розв'язок для розподілу напружень у склеєній структурі. Він може служити як вихідний пункт для більш точного моделювання розподілу напружень у склеєній структурі.

Для розрахунку розподілу напружень для склеєної подвійної обкладинки із хром-ерзацу з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) необхідно застосувати спеціалізоване програмне забезпечення для моделювання таке, як ANSYS, ABAQUS, або SolidWorks. Загальний опис підготовки вхідних даних та процесу моделювання представлено на рис. 3, а, б.

Коефіцієнт властивостей клею, що є одним із показників розрахунку міцності для інтегральних

обкладинок, використовується у математичних моделях для оцінки міцності склеєних структур, враховуючи його адгезію, когезію та в'язкість. Він може бути визначений на основі експериментальних даних або теоретичних розрахунків, допомагаючи інженерам визначити оптимальний клей для конкретних застосувань. Цей підхід сприяє розробці більш ефективних та надійних склеєних конструкцій, забезпечуючи розуміння взаємодії між клеєм, матеріалами та умовами експлуатації.

Опис коефіцієнта властивостей клею, який використовується для розрахунків формули загальної міцності M склеєних інтегральних обкладинок з хром-ерзацу, вимагає інтеграції різних фізичних характеристик клею, таких як адгезія, в'язкість, та термічна стабільність.

Адгезія, A , визначає силу зчеплення між поверхнями клею та хром-ерзацу. Це може бути представлено як функція відносної поверхні контакту S , між клеєм і матеріалом:

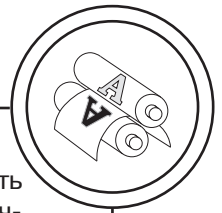
$$A = f(S). \quad (21)$$

В'язкість, η , впливає на здатність клею рівномірно розподілятися між склеюваними поверхнями. Вона може залежати від температури, T , та швидкості деформації, γ :

$$\eta = g(T, \gamma). \quad (22)$$

Термічна стабільність, Θ , може бути визначена як залежність властивостей клею від температури. Це важливо для забезпечення стабільності склеєного з'єднання при коливаннях температури:

$$\Theta = h(T). \quad (23)$$



Оскільки кожен із цих чинників впливає на загальну ефективність склеювання, інтегроване диференціальне рівняння має вид:

$$\frac{\partial K}{\partial t} = \alpha \frac{\partial f(S)}{\partial S} + \beta \frac{\partial g(T, \gamma)}{\partial T} + \delta \frac{\partial h(T)}{\partial T}, \quad (24)$$

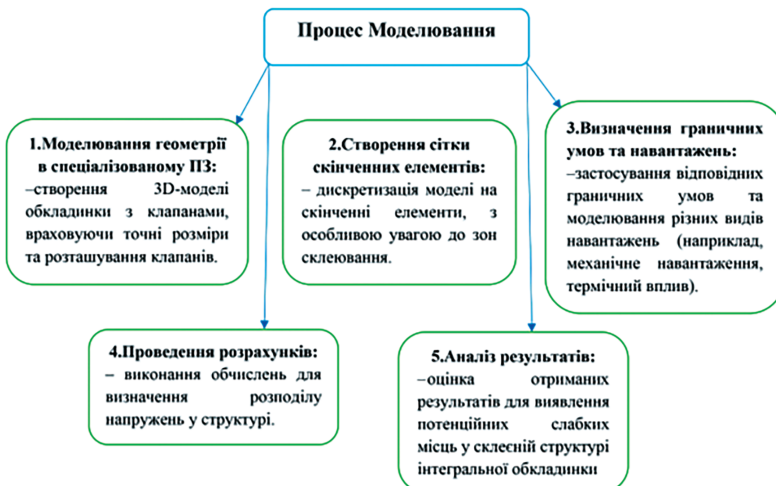
де K — це загальний коефіцієнт властивостей клею, а α , β ,

і δ — це коефіцієнти, які калібрують вплив адгезії, в'язкості, та термічної стабільності відповідно.

Значення цих коефіцієнтів можуть бути визначені на основі експериментальних даних. Враховуючи теоретичну складність цього диференціального рівняння, для реальних умов технологічного розрахунку ефективності клею та його впливу на склеювання конструктивних деталей розгортки інтегральних обкладинок

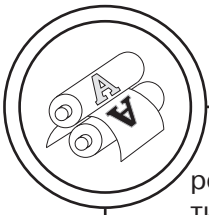


а



б

Рис. 3. Структурна побудова загального опису підготовки вхідних даних та процесу моделювання розрахунку розподілу напружень: а — підготовка вхідних даних; б — процес моделювання розподілу напружень



рекомендовано використовувати експериментальні методи та тести. Розрахунки з використанням таких рівнянь можуть вимагати детального аналізу та чисельного моделювання.

Коефіцієнт умов навколишнього середовища враховує вплив температури, вологості, UV випромінювання на властивості клею і його взаємодію з матеріалами під час виготовлення інтегральних обкладинок із хром-ерзацу. Зміни температури можуть впливати на в'язкість клею та його адгезію, в той час, як вологість важлива для водорозчинних клеїв, оскільки вона впливає на процес сушіння. Ультрафіолетове випромінювання та хімічні речовини в довіллі можуть змінювати хімічну структуру клею, впливаючи на його міцність та адгезію. Врахування цих аспектів необхідне для коректної оцінки міцності склеєних структур, особливо при використанні хром-ерзацу. Коефіцієнт умов навколишнього середовища, визначений на основі емпіричних даних чи лабораторних тестів, допомагає адаптувати дизайн склеєних конструкцій до реальних умов експлуатації, підвищуючи їх надійність та ефективність.

Створення диференційного рівняння для визначення коефіцієнта умов навколишнього середовища, який враховує вплив температури, вологості та UV випромінювання в процесі приклеювання клапанів розгортки інтегральної обкладинки вимагає інтеграції різних фізичних процесів у єдину математичну модель. Розглянемо основні аспекти, які потрібно врахувати: температура (Т) впливає на властивості клею та мате-

ріалу, може змінювати адгезію і в'язкість клею; вологість (Н) впливає на процес сушіння клею та його адгезійні властивості; UV випромінювання використовується для прискорення процесу закріплення клею (U) може впливати на старіння матеріалу та міцність з'єднання.

Диференційне рівняння може бути представлено у виді рівняння, що описує зміну коефіцієнта умов навколишнього середовища $K(T, H, U)$ залежно від цих чинників:

$$\frac{\partial K}{\partial t} = f\left(\frac{\partial T}{\partial t}, \frac{\partial H}{\partial t}, \frac{\partial U}{\partial t}\right), \quad (25)$$

де f — функція, яка описує, як зміни температури, вологості та UV випромінювання впливають на коефіцієнт умов навколишнього середовища.

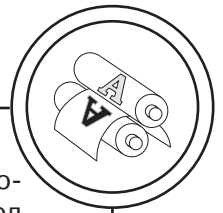
Ця функція може містити такі аспекти, як:

— залежність від температури: $f_T(T)$, яка визначає вплив температури на адгезію та в'язкість клею. При зміні температури, властивості клею змінюються, особливо близько температури скловання (для ПВА дисперсій середнє значення — $37,5^\circ$). Функція впливу температури може бути модельована як:

$$f_T(T) = e^{-\frac{(T-37,5)^2}{\delta T^2}}, \quad (26)$$

де δT — температурний діапазон, в якому властивості клею суттєво змінюються;

— залежність від вологості: $f_H(H)$, яка описує вплив вологості на сушіння та адгезію клею. Функція впливу вологості може бути модельована, як:



$$f_H(H) = \frac{1}{1 + \beta_H(H - H_0)^2}, \quad (27)$$

де H_0 — оптимальна вологість для клею, а β_H — параметр, що визначає чутливість клею до вологості;

— залежність від UV випромінювання: $f_U(U)$, яка визначає вплив UV випромінювання на старіння та міцність матеріалу. Функція впливу UV може бути модельована, як:

$$f_U(U) = \frac{1}{1 + \gamma_U U}, \quad (28)$$

де U — інтенсивність UV випромінювання, а γ_U — параметр, що визначає стійкість матеріалу до UV.

Загальний вираз для коефіцієнта умов навколишнього середовища, $K(T, H, U)$, може виглядати так:

$$K(T, H, U) = K_0 \cdot f_T(T) \cdot f_H(H) \cdot f_U(U), \quad (29)$$

де K_0 — базовий коефіцієнт без врахування зовнішніх чинників.

Цей загальний вираз дає можливість оцінити вплив різних умов навколишнього середовища на ефективність склеювання. Проте, для точного розрахунку цих функцій потрібні детальні експериментальні дані, які враховують специфіку використовуваних матеріалів та умов їх застосування.

Коефіцієнт методу нанесення клею у процесі з'єднання конструктивних деталей розгортки інтегральних обкладинок з хром-ерзацу дозволяє оцінити, як специфіка нанесення клею впливає на якість та міцність склеєного з'єднання. Цей коефіцієнт враховує чинники, такі як однорідність

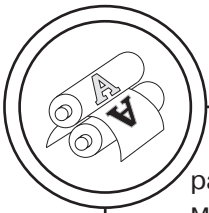
розподілу клею, товщину клейового шару та конкретний метод нанесення, що може варіюватися від повного покриття до точкового або лінійного нанесення.

Нерівномірне нанесення клею створює потенційні слабкі місця у склеєному з'єднанні, де можуть зосереджуватися напруження, збільшуючи ризик відшарування або розтріскування. На рис. 4 відтворено фрагменти перерізу композитних структур інтегральних обкладинок конструктивні частини яких склеєно суцільним шаром клею (рис. 4, а, б) та вибірково шаром клею (рис. 4, в, г), сформованим у стрічковий спосіб.

На рис. 4, а, б (поз. 1, 2) показано шар картону хром-ерзац, що є частиною клапана інтегральної обкладинки, де (1) — частина шару картону без вбирання дисперсії ПВА, а (2) — частина шару картону із вбіраною дисперсією ПВА в процесі склеювання обкладинки. Тотожний вигляд має поз. 4, 5, що відповідає частині шару картону хром-ерзац основи обкладинки із вбіраною дисперсією ПВА (4) та без неї (5). Поз. 3 відповідає частині шару клею нанесеного для склеювання конструктивних деталей інтегральних обкладинок.

Відзначальною особливістю суцільного склеювання конструктивних деталей інтегральних обкладинок є рівномірне деформування частин обкладинок, що вигинаються в процесі споживчого використання книжкових блоків з обкладинками (зони I, II, рис. 4, б).

На рис. 4, в, г показано склеєні конструктивні частини інтегральної обкладинки у стрічковий вибірково спосіб із частково вби-



раними дисперсіями ПВА зонами (поз. 6, 7). Окремими зонами показано частини композитної структури інтегральної обкладинки без вбирання дисперсії ПВА та створення зон напруження (III) та частини обкладинки із вбираною дисперсією ПВА та створенням зон напруження (IV). Відповідно, при вигинанні інтегральних обкладинок склеєних у стрічковий вибірковий спосіб, деформування означених ділянок відбувається не рівномірно, а відносно утворених зон напруження (V, VI). Слід звернути увагу на те, що деформувальні процеси в інтеграль-

них обкладинках, композитна структура яких утворена нанесенням суцільного шару клею, або вибіркового, буде суттєво залежати від глибини вбирання дисперсії ПВА в товщину картону хром-ерзац, яка, своєю чергою, залежатиме від пористості матеріалу, в'язкості клею, часу контакту, від температури та тиску. Для проведення попередніх розрахунків глибини поглинання дисперсії ПВА в картон хром-ерзац, як частини імітаційного моделювання розрахунків міцності інтегральних обкладинок, можливо використати спрощену версію закону

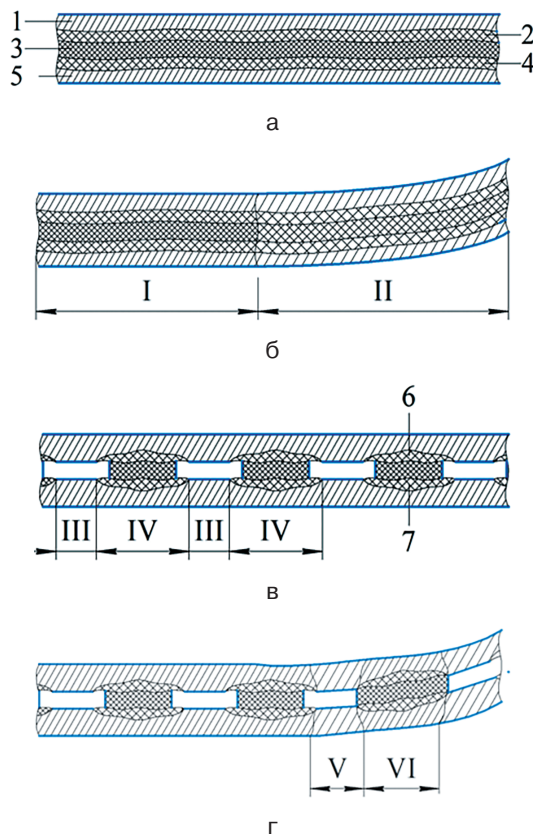
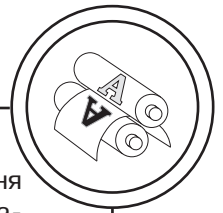


Рис. 4. Фрагменти перерізу композитної структури інтегральної обкладинки: а, б — з суцільним шаром клею; в, г — з вибірконим шаром клею



Дарсі, або рівняння дифузії, яке враховує в'язкість рідини та пористість матеріалу:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{k \cdot A \cdot \Delta P}{\mu}, \quad (30)$$

де $\frac{\partial V}{\partial t}$ — швидкість проникнення дисперсії ПВА в картон (обсяг за час); k — коефіцієнт проникності картону (залежить від пористості); A — площа контакту між клеєм і картоном; ΔP — градієнт тиску (може бути апроксимований як різниця тисків на зовнішній та внутрішній сторонах картонного шару); μ — в'язкість дисперсії ПВА.

Вибір оптимальної товщини клейового шару є технологічно значущим для забезпечення надійного з'єднання: надто тонкий шар може не забезпечувати необхідної адгезії, у той час, як надмірно товстий шар може негативно впливати на рівномірність передачі навантажень і призводити до збільшення часу висихання. При цьому, важливо також враховувати метод нанесення клею. Різні підходи, такі як точкове, лінійне або повністю покривальне нанесення, вимагають урахування специфіки конкретного застосування та вимог до міцності з'єднання. Наприклад, точкове нанесення може бути ефективним для зменшення загального об'єму використаного клею, що є важливим чинником ресурсоощадності, однак воно може не забезпечувати достатньої рівномірності у розподілі навантажень під час експлуатації. Метод нанесення клею, чи то ручний, чи механізований, також має значний вплив на однорідність розподілу клею та, відповідно, на якість з'єднання.

Коефіцієнт методу нанесення клею використовується для адаптації розрахунків міцності склеєного з'єднання з урахуванням обраного способу нанесення клею. Для визначення цього коефіцієнта можуть використовуватися експериментальні дані, які містять аналіз різних типів клеїв та методів їх нанесення на різні матеріали, включаючи хром-ерзац. Це особливо важливо в галузях, таких як поліграфія, де високі вимоги до точності та якості з'єднань є стандартизованими.

Диференціальне рівняння для коефіцієнта методу нанесення клею, яке враховує рівномірність та якість нанесення, може бути сформульоване з урахуванням кількох змінних, що характеризують процес нанесення. Основні чинники, які необхідно врахувати — розподіл клею по поверхні (рівномірність) та характеристики зчеплення (якість). Розглянемо наступні параметри:

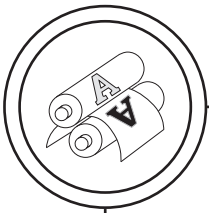
— $R(x, y)$ — розподіл клею на поверхні, де x та y — координати на поверхні склеювання;

— $A(x, y)$ — адгезійна якість клею в кожній точці, залежна від розподілу клею та властивостей матеріалів.

Для визначення рівномірності застосовано лапласіан розподілу клею, який дає уявлення про зміну концентрації клею в різних точках:

$$\begin{aligned} \nabla^2 R(x, y) &= \\ &= \frac{\partial^2 R}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 R}{\partial y^2}. \end{aligned} \quad (31)$$

Адгезійна якість може залежати від локальної концентрації клею та його властивостей. Це може бути представлено як функція від R :



$$A(x, y) = f(R(x, y)). \quad (32)$$

Інтегроване диференціальне рівняння для коефіцієнта методу нанесення клею, K , може враховувати обидва ці аспекти:

$$\frac{\partial K}{\partial t} = g(\nabla^2 R(x, y), A(x, y)), \quad (33)$$

де g — функція, що описує, як рівномірність розподілу клею та адгезійна якість впливають на загальний коефіцієнт ефективності методу нанесення клею.

Розв'язання цього рівняння, для практичного застосування в розрахунках міцності склеєних інтегральних обкладинок, здійснюється за допомогою чисельних методів, використовуючи комп'ютерне моделювання. Для чого необхідно встановити конкретні граничні умови, властивості клею та палітурного матеріалу виготовлення обкладинок, і, можливо, проведення експериментальних випробувань для збору необхідних даних.

Результати такого моделювання допоможуть визначити оптимальний спосіб склеювання, а також дадуть можливість виявити, де можуть виникнути високі концентрації напружень, що може призвести до відшарування або розлому. Ця інформація буде корисною для оптимізації конструкції розгортки інтегральних обкладинок та вибору кращих методів склеювання їх конструктивних деталей

Список використаної літератури

1. Палюх О. О. Дослідження впливу дискретного нанесення клею на міцність півжорстких книжково-журнальних обкладинок / О. О. Палюх // Зб. наук. праць «Технологія і техніка друкарства». К., 2019. № 3(65). С. 25–42. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(65\).2019.199727](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(65).2019.199727).
2. Suzana Pasanec Preprotić. Novel Approaches to Enhancing Sustainable Adhesive System Solutions in Contemporary Book Binding: An Overview /

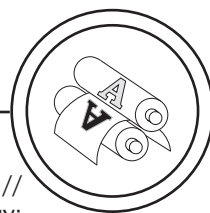
для забезпечення довговічності і надійності виготовлених тиражних обкладинок.

Висновки

1. Розроблено та досліджено процеси імітаційного моделювання, спрямовані на розрахунок міцності інтегральних обкладинок, які показали, що оптимізація методів нанесення клею та ефективне управління розподілом напружень у склеєних структурах суттєво підвищують довговічність та надійність завершених виробів та сприяють передбаченню механічних властивостей матеріалів під час виробництва.

2. Розроблено структуровані способи нанесення клею, зокрема точкове, лінійне та шаблонне, які, завдяки технікам розміщення точок, або ліній клею для мінімізації зон з високою концентрацією напружень та оптимізації відстаней між ними, сприяли не тільки зниженню витрат матеріалів, але й ефективному розподілу навантаження у склеєних конструкціях.

3. Розроблено рекомендації для оптимізації процесів виробництва інтегральних обкладинок, спрямовані на максимізацію міцності та довговічності продукції, включаючи вибір відповідних матеріалів, технік нанесення клею та методів управління напруженнями, що сприяють підвищенню загальної ефективності виробничих процесів.



Suzana Pasanec Preprotić, Marina Vukoje, Gorana Petković, Mirela Rožić // *Heritage*. 2023. № 6(1). Pp. 628–646. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2571-9408/6/1/33>.

3. Gadhav R. Adhesives for the Paper Packaging Industry: An Overview / R. Gadhav, C. Gadhav // *Open Journal of Polymer Chemistry*. 2022. № 12. pp. 55–79. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=117010>.

4. Guido Raos. Polymer Adhesion: Seeking New Solutions for an Old Problem / Guido Raos, Bruno Zappone // *Macromolecules*. 2021. 54. 23. pp. 10617–10644. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.macromol.1c01182>.

5. Горященко С. Дослідження попереднього склеювання деталей легкої промисловості полімерними матеріалами / С. Горященко, Є. Голінка, Г. Драпак, К. Горященко, О. Поліщук // *Вісник ХНУ. Технічні науки*. 2022. С. 274–278. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://elar.khmnu.edu.ua/items/452ead98-caf2-4ef3-8af6-c61dc972aeec>.

6. Claudia Anna Dohr. Influence of paper properties on adhesive strength of starch gluing / Claudia Anna Dohr, Ulrich Hirn // *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 2022. 37(1): 120–129. <https://doi.org/10.1515/npprj-2021-0039>.

7. Eshbaeva Ulbosin Jamalovna. Development of Technology for Producing Multilayer Paper and Cardboard Containing Synthetic Fibers / Ulbosin Jamalovna Eshbaeva, Anvar Abdugafarovich Djalilov // *Nat. Volatiles & Essent. Oils*. 2021. 8(5): 10637–10644. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.nveo.org/index.php/journal/article/view/3009>.

8. Pełczyński P. Measurement and Control of Corrugated Board Production Parameters Taking into Account Individual Operator Preferences / P. Pełczyński, K. Kadys, Szewczyk W. // *Sensors*. 2023. № 23(14). pp. 6478. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/14/6478>.

9. Jenny Ria Rajagukguk. Valuing recycled waste paper by the design and management of a book cover model-YRR.18 / Jenny Ria Rajagukguk // *Airlangga Journal of Innovation Management*. June 2020. Vol. 1. No.1. pp. 92–100. <https://doi.org/10.20473/ajim.v1i1.19401>.

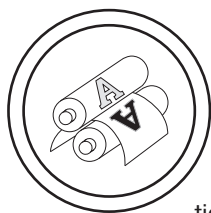
10. Francesco Marchione. Stress distribution in double-lap adhesive joints: Effect of adherend reinforcement layer / Francesco Marchione // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. March 2021. Volume 105. pp. 102780. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102780>.

References

1. Paliukh, O. O. (2019). Doslidzhennia vplyvu dyskretnoho nanesennia kleiu na mitsnist pivzhorstkykh knyzhkovo-zhurnalnykh obkladynok [Investigation of the Influence of Discrete Adhesive Application on the Strength of Semi-Rigid Book-Magazine Covers]. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, 3(65), 25–42. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(65\).2019.199727](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(65).2019.199727) [in Ukrainian].

2. Pasanec Preprotić, S., Vukoje, M., Petković, G., & Rožić, M. (2023). Novel Approaches to Enhancing Sustainable Adhesive System Solutions in Contemporary Book Binding: An Overview. *Heritage*, 6(1), 628–646. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2571-9408/6/1/33> [in English].

3. Gadhav, R., & Gadhav, C. (2022). Adhesives for the Paper Packaging Industry: An Overview. *Open Journal of Polymer Chemistry*, 12, 55–79. Retrieved from <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=117010> [in English].



4. Raos, G., & Zappone, B. (2021). Polymer Adhesion: Seeking New Solutions for an Old Problem. *Macromolecules*, 54, 23, 10617–10644. Retrieved from <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.macromol.1c01182> [in English].
5. Horiashchenko, S., Holinka, Ye., Drapak, H., Horiashchenko, K., & Polishchuk, O. (2022). Doslidzhennia popередnoho skleiuвання detalei lehkoi promyslovosti polimernymy materialamy [Research of preliminary gluing of parts of light industry with polymer materials]. *Visnyk KhNU. Tekhnichni nauky*, 274–278. Retrieved from <https://elar.khmnmu.edu.ua/items/452ead98-caf2-4ef3-8af6-c61dc972aeec> [in Ukrainian].
6. Dohr, C. A., & Hirn, U. (2022). Influence of paper properties on adhesive strength of starch gluing. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 37(1): 120–129. <https://doi.org/10.1515/npprj-2021-0039>.
7. Eshbaeva, U. J., & Djalilov, A. A. (2021). Development of Technology for Producing Multilayer Paper and Cardboard Containing Synthetic Fibers. *Nat. Volatiles & Essent. Oils*, 8(5): 10637–10644. Retrieved from <https://www.nveo.org/index.php/journal/article/view/3009> [in English].
8. Pełczyński, P., Kadys, K., & Szewczyk, W. (2023). Measurement and Control of Corrugated Board Production Parameters Taking into Account Individual Operator Preferences. *Sensors*, 23(14), 6478. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/14/6478> [in English].
9. Rajagukguk, J. R. (June 2020). Valuing recycled waste paper by the design and management of a book cover model-YRR.18. *Airlangga Journal of Innovation Management*, Vol. 1, No. 1, 92–100. <https://doi.org/10.20473/ajim.v1i1.19401>.
10. Marchione, F. (March 2021). Stress distribution in double-lap adhesive joints: Effect of adherend reinforcement layer. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 105, 102780. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102780>.

The work explores various aspects of simulation modeling, including the choice of materials, processing methods and design features of covers, with an emphasis on reducing resource consumption and increasing the environmental efficiency of production.

Keywords: simulation modeling; strength of integral covers; analytical studies; resource-saving technologies; environmental sustainability.

Надійшла до редакції 09.09.23