

УДК 686.1.023.2

DOI: 10.20535/2077-7264.1(83).2024.305494

© П. О. Киричок, д-р техн. наук, проф., Д. О. Палюх,
асп., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЕОМЕТРІЇ ПРОФІЛЮ ТА МІКРОРЕЛЬЄФНОГО ЗМІЦНЕННЯ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ФАЛЬЦЮВАЛЬНИХ ПЛАСТИН

Об'єктом дослідження є процеси формування геометрії профілю та мікрорельєфного зміцнення, що впливають на зносостійкість пластин для фальцювання інтегральних обкладинок. Аналітичні та експериментальні дослідження базуються на розробці імітаційної моделі процесу зношування фальцювальних пластин.

Ключові слова: мікрорельєфні напрямні; точкове формування; геометрія профілю; фальцювальні пластини.

Вступ

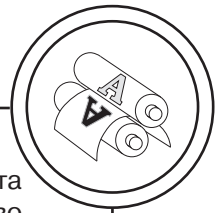
Процес фальцювання розгортки інтегральних обкладинок є важливим етапом у виробництві поліграфічної продукції, такої як книги, журнали, брошури та інші видання. Якість фальцювання обкладинок суттєво впливає на кінцеву якість продукції, забезпечуючи її естетичну привабливість, міцність та довговічність. У сучасних умовах виробництва особливу увагу приділяють матеріалам, з яких виготовляються фальцювальні пластини, оскільки їх робочі характеристики визначають ефективність та якість процесу фальцювання.

Фальцювальні пластини виготовляються з різних матеріалів, серед яких нержавіюча сталь займає особливе місце завдяки своїм фізико-механічним властивостям. Нержавіюча сталь характеризується високою корозійною

стійкістю та помірною твердістю, що робить її придатною для використання в умовах впливу вологи та полівінілацетатної дисперсії, використовуваної для склеювання інтегральних обкладинок. Для підвищення експлуатаційних характеристик фальцювальних пластин застосовуються методи зміцнення, які дозволяють значно збільшити їх зносостійкість та довговічність.

Ціль цього дослідження — оцінка впливу геометрії профілю та мікрорельєфного зміцнення на зносостійкість фальцювальних пластин для інтегральних обкладинок. Основне припущення дослідження полягає в тому, що використання мікрорельєфного зміцнення сприятиме підвищенню твердості та зносостійкості фальцювальних пластин, тим самим покращуючи якість процесу фальцювання.

© Автор(и) 2024. Видавець КПІ ім. Ігоря Сікорського.
CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Значну увагу приділено порівнянню двох типів фальцювальних пластин: з профілем, сформованим осьовим згинанням металевої видовженої пластини під кутом 90° та з профілем, сформованим евольвентною кривою. Порівняння показало, що евольвентна крива забезпечує кращий розподіл напружень та зносостійкість, тоді як профіль зі згином на 90° є простішим та економічнішим у виробництві. Вибір між цими двома профілями залежить від конкретних вимог застосування, причому евольвентна крива більш підходить для точних і складних завдань фальцювання.

Дослідження також включає аналіз економічної ефективності використання різних методів утворення профілів фальцювальних пластин. Це дозволяє значно підвищити ефективність виробництва та якість кінцевої продукції.

Таким чином, дане дослідження надає докладний аналіз впливу геометрії профілю та мікрорельєфного зміцнення на зносостійкість фальцювальних пластин, що дозволяє оптимізувати процеси фальцювання та вибір матеріалів для досягнення високих результатів якості у виробництві інтегральних обкладинок.

Постановка проблеми

Сучасна поліграфічна індустрія стрімко розвивається, вимагаючи постійного вдосконалення палітурних матеріалів та технологій. Одним із важливих елементів фальцювально-склеювальних ліній для виготовлення інтегральних обкладинок є фальцювальні пластини, що забезпечують технологічний процес формування з розгортки цілісного якісного

виробу. Збільшення накладів та швидкості фальцювання суттєво впливає на зносостійкість цих елементів. Традиційні матеріали та конструкції фальцювальних пластин не завжди можуть витримати експлуатаційні навантаження, що призводить до передчасного зносу, погіршення якості фальцювання та збільшення витрат на обслуговування обладнання [1].

Існують численні дослідження, присвячені вивченню впливу різних чинників на зносостійкість фальцювальних пластин. Проте недостатньо уваги приділено дослідженню впливу геометрії профілю та мікрорельєфного зміцнення на цю характеристику. Метою даного дослідження є комплексне вивчення впливу геометрії профілю та мікрорельєфного зміцнення на зносостійкість фальцювальних пластин.

Для досягнення поставленої мети необхідно провести детальний аналіз впливу різних геометричних параметрів профілю на зносостійкість, розробити та експериментально випробувати методи мікрорельєфного зміцнення, оцінити їхній вплив на довговічність та оптимізувати конструкцію і техніку обробки з погляду тривалості застосування.

Наукова новизна даного дослідження полягає в комплексному підході до вивчення впливу геометрії профілю та мікрорельєфного зміцнення на зносостійкість фальцювальних пластин з покращеними експлуатаційними характеристиками. В результаті дослідження очікується отримати науково обґрунтовані дані про вплив геометрії профілю та мікрорельєфного зміцнення, а також ефективні



методи підвищення зносостійкості та рекомендації щодо оптимізації конструкції та технік обробки поверхні.

Дослідження впливу геометрії профілю та мікрорельєфного зміцнення на зносостійкість фальцювальних пластин є актуальною науковою та практичною задачею. Результати дослідження можуть мати значний вплив на розвиток поліграфічного виробництва та покращити якість книжково-журнальної продукції.

Аналіз попередніх досліджень

Автори дослідження [2] аналізують мікроструктуру та зносостійкість шарів зміцнення, які утворені методом наплавлення твердих сплавів на поверхні деталей. Дослідження показало, що збільшення вмісту хрому та вольфраму у покритті значно підвищує зносостійкість робочих поверхонь. Методологія такого зміцнення може бути застосована для поліпшення зносостійкості фальцювальних пластин. Попри значні переваги представленої технології зміцнення, відсутній аналіз властивостей покриття при лазерному або плазмовому наплавленні, що може вплинути на зносостійкість і довговічність фальцювальних пластин.

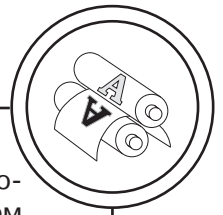
У матеріалах статті [3] розглянуто вплив енергетичної щільності лазерного наплавлення на мікроструктуру та зносостійкість нікелевих покриттів з вольфрамовими карбідами. Висока енергетична щільність покращує зносостійкість шляхом утворення твердих часток у покритті, що може бути корисним для зміцнення

фальцювальних пластин. Проте, дослідження не розглядає впливу різних комбінацій хрому та вольфраму на мікроструктуру фальцювальних пластин.

Завдання дослідження [4] полягає у детальному розгляді впливу багатоточкової ультразвукової обробки на мікрорельєф та зносостійкість поверхонь. Виявлено, що ультразвукова обробка значно покращує зносостійкість шляхом утворення мікрорельєфу, що знижує тертя та знос. Проте, дослідження не містить аналізу параметрів ультразвукової обробки, таких як частота, амплітуда та тривалість, на мікрорельєф і його довговічність, а також можливих негативних наслідків для цілісності матеріалу при інтенсивній обробці.

У публікації [5] досліджуються технології комбінованого впливу лазерного загартування та ультразвукової обробки на мікроструктуру та зносостійкість поверхонь. Показано, що комбіноване застосування цих методів значно підвищує твердість та зносостійкість. Проте, дослідження не охоплює послідовності лазерного загартування та ультразвукової обробки, а також впливу різних режимів обробки на довготривалу стабільність і поведінку матеріалу під циклічними навантаженнями.

У наступному дослідженні [6] розглядаються техніки зміцнення поверхонь на прикладі ультразвукової обробки кульок зі сталі 440С. Виявлено, що ультразвукова обробка значно покращує твердість та зносостійкість, що може бути застосовано для зміцнення фальцювальних пластин. Однак, дослідження не включає



аналізу впливу ультразвукової обробки на різні типи сталі та інших матеріалів, а також не розглядає довгострокові експлуатаційні випробування для визначення стабільності та довговічності зміцнених поверхонь в умовах реального використання.

Метою наступної роботи [7] є аналіз та порівняльний огляд впливу термічної обробки на мікроструктуру та зносостійкість сплаву Ti6Al4V. Оптимізація параметрів термічної обробки покращує зносостійкість, що може бути корисним для застосування у фальцювальних пластинах. Проте, дослідження не бере до уваги комбінованих методів термічної обробки з іншими техніками зміцнення, такими як лазерне загартування або ультразвукова обробка, а також не розглядає впливу різних експлуатаційних умов на довговічність та стабільність змінених матеріалів.

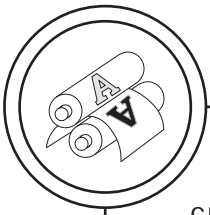
У статті [8] наведено результати впливу ультразвукової обробки на мікроструктуру та зносостійкість металевих виробів, виготовлених методом адитивного виробництва. Виявлено, що ультразвукова обробка значно покращує зносостійкість, знижуючи тертя і знос внаслідок утворення мікрорельєфу. Проте, дослідження не включає аналізу впливу параметрів ультразвукової обробки, таких як частота, амплітуда та тривалість, на мікроструктуру та зносостійкість, а також впливу на інші матеріали в адитивному виробництві.

Додатково до цього, в публікації [9] систематизовано чинники впливу ультразвукової обробки на поверхневу цілісність сплаву нікелю 718. Результати показали,

що ультразвукова обробка покращує зносостійкість шляхом зниження концентрації мікростресу і покращення якості поверхні, що може бути суттєвим чинником для вдосконалення технології виготовлення фальцювальних пластин. Однак, попри переваги цього методу, не враховано комбінації ультразвукової обробки з іншими методами зміцнення, такими як лазерне загартування, для підвищення зносостійкості фальцювальних пластин.

Мета дослідження [10] полягає у ґрунтовному описі ефективності методів покращення зносостійкості різних матеріалів, включаючи мікрорельєфне зміцнення. Розглянуто вплив різних геометричних параметрів на зносостійкість та ефективність методів зміцнення. Проте, дослідження не враховує довготривалості ефективності цих методів у реальних робочих умовах і не розглядає комбіновані методи зміцнення для підвищення зносостійкості та тривалості матеріалів.

Дослідження [11] фокусується на поєднанні статичних та динамічних навантажень під час ультразвукової ударної обробки поверхонь деталей з інтенсивними умовами експлуатації. Виявлено, що ця технологія значно покращує поверхневу зносостійкість і може бути застосована у виготовленні фальцювальних пластин. Хоча отримані результати мають значний практичний інтерес, проте, дослідження не містить параметрів ультразвукової ударної обробки, такі як частота та амплітуда, що впливають на мікроструктурні зміни та довговічність матеріалів.



Таким чином, актуальність дослідження полягає у необхідності підвищення ефективності та довговічності деталей фальцювально-склеювального апарату лінії для виготовлення інтегральних обкладинок. Вагомими чинниками, що впливають на зносостійкість фальцювальних пластин, які забезпечують точність та якість фальцювання обкладинок, є геометрія профілю та методи мікрорельєфного зміцнення. Дослідження у цій галузі дозволяють визначити оптимальні характеристики та параметри зміцнення, які сприятимуть зменшенню тертя та зносу пластин, підвищуючи продуктивність і надійність виробничих процесів. Це також допоможе оптимізувати витрати на обслуговування лінії та зменшити кількість дефектних обкладинок, вилучених з накладу через недоліки фальцювання.

Мета роботи

Аналітичне вивчення впливу геометрії профілю та мікрорельєфного зміцнення на зносостійкість фальцювальних пластин. Це дозволить розробити оптимізовані процедури та технічні рекомендації для підвищення довговічності та ефективності роботи фальцювальних пластин.

Завдання дослідження включають:

- аналіз впливу різних геометричних параметрів профілю на зносостійкість фальцювальних пластин;
- розробку та експериментальне дослідження методів мікрорельєфного зміцнення для підвищення довговічності;
- оцінку ефективності мікрорельєфного зміцнення щодо підвищення зносостійкості;

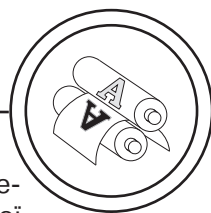
— оптимізацію геометрії профілю та методів зміцнення для забезпечення тривалого використання фальцювальних пластин.

Результати проведених досліджень

У сучасному поліграфічному виробництві висока швидкість фальцювання розгорток інтегральних обкладинок є важливим чинником для забезпечення ефективності та продуктивності технологічного процесу. Вона сприяє виготовленню якісних обкладинок, оптимізуючи час виробництва та знижуючи витрати. Швидке фальцювання дозволяє досягти високої продуктивності, що особливо важливо при великих обсягах виробництва. Крім того, підвищення швидкості фальцювання може позитивно вплинути на загальну якість обкладинок, забезпечуючи точність та рівномірність згинів, естетичність вигляду та функціональність книжково-журнальної продукції.

Для цього широко використовуються фальцювальні пластини з нержавіючої сталі, які витримують значні механічні навантаження та зберігають свої експлуатаційні характеристики протягом тривалого часу. Метою математичного розрахунку інтенсивності зношування цих планок є визначення оптимальних умов експлуатації та вибір найбільш відповідних матеріалів для їх виготовлення, що забезпечить максимальну довговічність і надійність у процесі інтенсивного швидкого фальцювання.

Вибір фальцювальних планок для подальших досліджень повинен ґрунтуватися на аналізі їх конструктивних особливостей



та експлуатаційних характеристик. У цьому контексті доцільно зосередити увагу на двох видах пластин: з осьовим вигином на кут 90° та пластин, утворених за допомогою евольвентної кривої.

Фальцювальні пластини з осьовим вигином на 90° (рис. 1) відзначаються простотою та економічністю у виробництві. Їх конструкція дозволяє швидко та ефективно виконувати базові фальцювальні операції. Такі пластини забезпечують достатню функціональність для стандартних завдань масового виробництва інтегральних обкладинок, для яких ефективність виготовлення полягає у низькій технологічній вартості та високій продуктивності. Вони підходять для умов, де відсутні високі вимоги до точності і довговічності. Однак, ці пластини схильні до концентрації напружень в місцях осьового вигину, що може призводити до швидкого зношування та виникнення мікротріщин, знижуючи їх експлуатаційну довговічність.

На рис. 1 зображено фальцювальну профільну пластину утво-

рену осьовим вигином на 90° металевої видовженої прямокутної пластини з заovalеними кутами. Січні площини з вершинами, позначеними буквами a, b, c, поділяють серединну частину профільної пластини на дві умовні зони, що плавно переходять одна в іншу.

Лінійні відстані, на які поширюється геометрична відмінність мікрорельєфних напрямних, нанесених на робочу поверхню фальцювальних пластин, позначені, як L_{lin} — відстань, на якій завершується прямолінійний стан (вершини січних площин b, c) мікрорельєфних напрямних (поз. 1) без ознак руйнівних дефектів та L_{destr} — відстань (вершини січних площин a, b), на якій виникають руйнівні дефекти мікрорельєфних напрямних (поз. 2), викликаних осьовими вигинами в серединній частині профільної фальцювальної пластини.

З іншого боку, фальцювальні пластини, утворені за допомогою евольвентної кривої (рис. 2), забезпечують плавний розподіл напружень, що значно зменшує

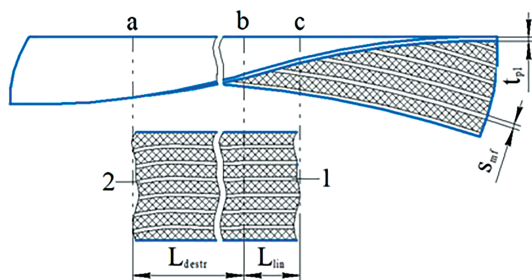
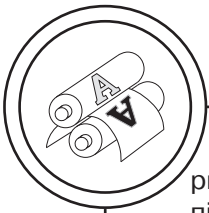


Рис. 1. Фальцювальна профільна пластина з осьовим вигином на кут 90° : 1 — мікрорельєфні напрямні без руйнівних дефектів; 2 — мікрорельєфні напрямні з руйнівними дефектами в місцях осьового вигину; a, b, c — координати січних площин; L_{lin} — перехідна розмірна зона без руйнівних дефектів; L_{destr} — розмірна зона виникнення осьових дефектів; t_{pl} — товщина пластини; s_{mf} — ширина мікрорельєфних напрямних



ризик утворення мікротріщин і підвищує довговічність пластин. Евольвентна крива дозволяє рівномірніше розподіляти механічні навантаження, знижуючи ризик локальних перегрівів і підвищуючи загальну якість фальцювання.

На рис. 2 зображено фальцювальну пластину, профіль якої утворено евольвентною кривою. Січні площини з вершинами, позначеними буквами a , b , виокремлюють серединну частину пластини, за аналогією з рис. 1, та фіксують незмінність геометрії мікрорельєфних напрямних (поз. 1) від початку пластини й до її кінцевої частини без руйнівних дефектів. Лінійна відстань виокремленої зони позначено, як L_{jin} .

Хоча виробництво таких планок є складнішим і дорогим, вони забезпечують високу універсальність та точність, особливо важливу для складних фальцювальних завдань. Завдяки цим перевагам, евольвентні пластини підходять для високоякісних поліграфічних книжково-журнальних виробів, де точність виготовлення та тривалий термін експлуа-

тації є основними складниками високої ціни завершеного виробу. Порівняльні характеристики фальцювальних пластин систематизовано і представлено у табл. 1.

Порівняльний аналіз фальцювальних пластин показує, що пластини з вигином на 90° вздовж осьової лінії є простішими та дешевшими у виробництві. Їхня конструкція забезпечує достатню функціональність для простих фальцювальних завдань. З іншого боку, пластини, робоча поверхня яких сформована за допомогою евольвентної кривої, вимагають складніших виробничих технологій, що робить їх дорожчими. Однак такі пластини забезпечують вищу універсальність та точність, особливо для складних фальцювальних завдань. Евольвентні пластини дозволяють рівномірніше розподіляти навантаження, що знижує ризик локальних дефектів і підвищує загальну якість фальцювання.

Евольвентна крива $r(\theta)$ визначається параметрично як:

$$x(\theta) = R(\sin(\theta) + \theta(\cos(\theta)),$$

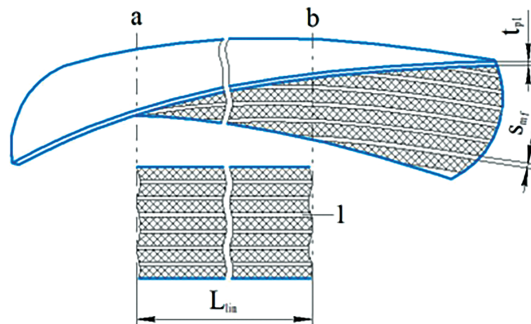
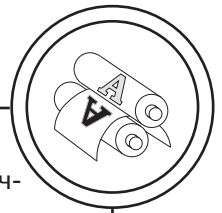


Рис. 2. Евольвентна фальцювальна пластина: 1 — мікрорельєфні напрямні без руйнівних дефектів; a , b — координати січних площин; L_{jin} — розмірна зона без руйнівних дефектів; t_{pl} — товщина пластини; smf — ширина мікрорельєфних напрямних



$$y(\theta) = R(\cos(\theta) - \theta(\sin(\theta)),$$

де R — радіус основного кола, а θ — кут параметризації.

Для евольвентної кривої розподіл напружень можна описати через рівняння теорії пружності для кривих поверхонь. В евольвентних кривих напруження розподіляються рівномірно через гладкий перехід кривини, що забезпечує плавний розподіл сил. Загальний вигляд тензора напружень для гладкої кривої поверхні:

$$\sigma_{ij} = E\varepsilon_{ij},$$

де E — модуль Юнга, ε_{ij} — тензор деформації.

Рівняння Ламе для циліндричних оболонок:

$$\sigma_{\theta} = \frac{F}{2\pi Rt},$$

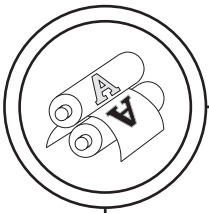
де σ_{θ} — тангенціальне напруження, F — прикладена сила, t — товщина пластини, R — радіус кривини.

У випадку пластини з осьовим вигином на 90° напруження концентруються в місці вигину. Це можна описати за допомогою концентрації напружень, де формула концентрації напружень для осьового вигину:

Таблиця 1

Порівняльні характеристики фальцювальних пластин

Характеристика	Фальцювальна пластина з осьовим вигином на 90°	Евольвентна фальцювальна пластина
Конструкція та геометрія	Металева смуга, зігнута вздовж осьової лінії на 90°	Сформована за допомогою евольвентної кривої
Матеріал і структура	Однорідна металева структура	Більш складна і точна форма
Кут осьового вигину	90°	Евольвентна крива
Переваги	Простота виготовлення, економічність, міцність	Точність згинів, гнучкість, зменшення напружень
Недоліки	Обмежена гнучкість, можливість концентрації напружень, непридатність для складних схем	Складність виготовлення, вищі витрати, матеріальні вимоги
Простота виготовлення	Легка у виготовленні через простий процес вигину	Складніша у виготовленні через складну геометрію
Вартість	Менш дорога	Вищі витрати на виробництво
Зносостійкість	Однорідна структура може забезпечити високу міцність	Плавний вигин зменшує ризик утворення точок концентрації напружень
Гнучкість	Обмежена гнучкість	Пристає до різних схем і вирівнювань
Точність	Може бути непридатною для точних вимог	Забезпечує високу точність у фальцюванні



$$\sigma_{\max} = K_t \sigma_0,$$

де K_t — коефіцієнт концентрації напружень, σ_0 — номінальне напруження.

При більш різкому вигині коефіцієнт концентрації напружень K_t значно збільшується через різкий змінний розподіл напружень: $\sigma_{\max} \approx 3\sigma_0$.

Формула тензора деформацій для евольвентної фальцевальної пластини може бути представлена через компоненти деформаційного тензора ε_{ij} . Тензор деформацій описує зміну форми матеріалу під дією напружень і визначається наступним чином:

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{2} \left(\begin{array}{c} \frac{\delta u_i}{\delta x_j} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i} + \\ + \frac{\delta u_k}{\delta x_i} \frac{\delta u_k}{\delta x_j} \end{array} \right),$$

де u_i, u_j, u_k — компоненти вектора переміщень в напрямках x_i, x_j, x_k відповідно, x_i, x_j, x_k — координати у відповідних напрямках.

Для евольвентної кривої, переміщення можна розкласти у компоненті нормальної і тангенціальної складових вздовж кривої. При цьому, переміщення уздовж евольвентної кривої можна описати параметрично через координати $x(\theta)$ та $y(\theta)$:

$$x(\theta) = R(\sin(\theta) + \theta(\cos(\theta)),$$

$$y(\theta) = R(\cos(\theta) - \theta(\sin(\theta)),$$

де R — радіус основного кола, а θ — кут параметризації.

Тоді компоненти деформаційного тензора можуть бути обчислені, враховуючи відповідні частинні похідні векторів переміщень уздовж евольвентної кривої. Для спрощення, в загальному випа-

дку для евольвентної пластини ми можемо розглядати деформації в локальній системі координат уздовж кривої, де ε_{xx} буде описувати деформацію вздовж кривої, ε_{yy} — нормальну деформацію, і ε_{xy} — зсувну деформацію.

Основні компоненти тензора деформацій:

Тангенціальна деформація

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\delta u_x}{\delta x} = \frac{\delta x(\theta)}{\delta \theta} \frac{\delta \theta}{\delta x}.$$

Нормальна деформація

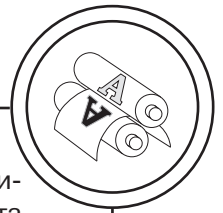
$$\varepsilon_{yy} = \frac{\delta u_y}{\delta y} = \frac{\delta y(\theta)}{\delta \theta} \frac{\delta \theta}{\delta y}.$$

Зсувна деформація

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta u_x}{\delta y} + \frac{\delta u_y}{\delta x} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta x(\theta)}{\delta \theta} \frac{\delta \theta}{\delta y} + \frac{\delta y(\theta)}{\delta \theta} \frac{\delta \theta}{\delta x} \right).$$

У випадку евольвентної кривої, ці компоненти мають враховувати кривину кривої й зміщення, спричинене згинами та іншими деформаційними впливами. Для уточнення математичного представлення тензора деформацій для евольвентної фальцевальної пластини необхідно врахувати компоненти тензора в локальній системі координат уздовж евольвентної кривої.

Тензор деформацій для пластини з вигином на 90° може бути описаний за допомогою компонент деформаційного тензора



в локальній системі координат. Осьовий вигин на 90° створює високі концентрації напружень в точці вигину, що потрібно враховувати в розрахунках.

Для забезпечення надійної та тривалої роботи фальцювальних пластин важливо не лише враховувати конструктивні особливості, такі як геометрія вигину, але й розробити комплексний підхід до аналізу та прогнозування їх зношування. Геометричні характеристики фальцювальних пластин мають значний вплив на їхні експлуатаційні властивості. Пластини з евольвентною кривою забезпечують рівномірний розподіл напружень, що зменшує ризик утворення мікротріщин і підвищує довговічність матеріалу. Натомість пластини з осьовим вигином на 90° схильні до концентрації напружень, що може призводити до передчасного зношування і втрати експлуатаційних характеристик.

Розуміння цих особливостей є ключовим для розробки ефективних моделей зношування, які враховують усі важливі чинники експлуатації. У цьому контексті розробка математичної моделі дозволить не лише прогнозувати термін служби фальцювальних пластин, але й оптимізувати умови їхньої експлуатації.

Розроблена математична модель зношування базується на детальному аналізі теоретичних та експериментальних даних, що дозволяє врахувати низку ключових чинників. Перш за все, модель враховує механічні властивості нержавіючої сталі, яка використовується для виготовлення фальцювальних пластин до яких,

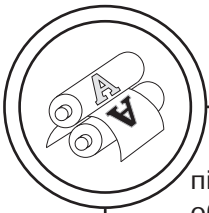
першочергово, слід віднести високу експлуатаційну міцність та стійкість до корозії.

Одним з основних чинників, які враховуються в моделі, є абразивне зношування, що виникає в результаті постійного швидкісного тертя між фальцювальною пластиною та розгортками інтегральних обкладинок із хром-ерзацу. Це тертя призводить до поступової втрати матеріалу з поверхні пластини, що поступово знижує її ефективність та довговічність.

Іншим важливим аспектом є вплив високих швидкостей фальцювання на температурний режим роботи фальцювальних пластин. Під час високошвидкісного фальцювання відбувається нагрівання пластин, що може спричинити зміну їх фізичних властивостей та прискорити процес зношування. З цієї причини модель включає аналіз теплових навантажень та їх вплив на структуру і міцність нержавіючої сталі.

Крім того, у моделі враховується вплив хімічних компонентів, зокрема полівінілацетатної дисперсії, яка використовується для склеювання конструктивних деталей обкладинок. Ця речовина може взаємодіяти з поверхнею нержавіючої сталі, спричиняючи корозію та інші види зношування.

Для оптимізації умов експлуатації фальцювальних пластин проведено математичний розрахунок, який враховує зазначені чинники. Результати цього розрахунку сприятимуть визначенню оптимальної швидкості фальцювання, допустимих навантажень та інших параметрів, які мінімізують знос і продовжують термін служби фальцювальних пластин. Це дозволить



підвищити ефективність роботи обладнання, зменшити витрати на технічне обслуговування та забезпечити стабільну якість продукції. Аналіз отриманих даних дасть змогу виявити критичні точки навантаження, оптимізувати матеріальні властивості та геометричні характеристики фальцювальних пластин, що в кінцевому результаті сприятиме підвищенню загальної продуктивності та надійності виробничих процесів.

Для виконання математичного розрахунку інтенсивності зношування фальцювальних пластин з нержавіючої сталі, враховано наступні параметри, занесені в табл. 2.

За цих умов,

$$\text{Сила тертя: } F_{\text{тр}} = \mu N = 0,5 \times 50 = 25 \text{ Н.}$$

$$\text{Робота тертя: } W_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} \cdot d, \quad d = v \cdot t, \text{ (для часу } t\text{).}$$

$$\text{Припустимо, } t = 10 \text{ с, тоді } d = 1 \text{ м/с} \times 10 \text{ с} = 10 \text{ м.}$$

$$W_{\text{тр}} = 25 \text{ Н} \times 10 \text{ м} = 250 \text{ Дж.}$$

Температурний підйом:

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{W_{\text{тр}}}{mc} = \\ &= \frac{250 \text{ Дж}}{0,01 \text{ кг} \times 500 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})} = \\ &= 50 \text{ К.} \end{aligned}$$

Зміна твердості при підвищенні температури:

$$\begin{aligned} H(T) &= H_0(1 - \alpha(\Delta T)) = \\ &= 200 \text{ ГПа} (1 - 0,005 \times 50) = \\ &= 200 \text{ ГПа} \times 0,75 = 150 \text{ ГПа.} \end{aligned}$$

Інтенсивність зношування з урахуванням температури:

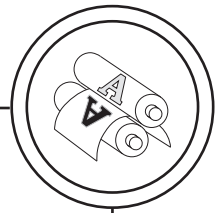
$$\begin{aligned} I &= k \frac{F_{\text{тр}}}{H(T)} = 1 \times 10^{-8} \frac{25}{150 \times 10^9} = \\ &= 1,67 \times 10^{-19} \text{ м}^2 (\text{Н} \cdot \text{м}). \end{aligned}$$

Після проведення математичного розрахунку встановлено, що підвищення температури на 50 К суттєво впливає на твердість нержавіючої сталі, зменшуючи її з 200 ГПа до 150 ГПа. Це зниження твердості призводить до значного збільшення інтенсивності

Таблиця 2

Показники вихідних параметрів

№	Вихідні параметри	Значення параметрів
1	Коефіцієнт тертя (μ)	0,5
2	Нормальна сила (N)	50 Н
3	Швидкість тертя (v)	1 м/с
4	Маса контактуючого матеріалу (m)	0,01 кг
5	Теплоємність (c)	500 Дж/(кг·К)
6	Коефіцієнт зношування (k)	$1 \times 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{Н} \cdot \text{м})$
7	Твердість нержавіючої сталі (H)	200 HV (ГПа)
8	Коефіцієнт температурного зниження твердості (α)	0.005 (К ⁻¹)



зношування, яка при підвищеній температурі становить $1,67 \times 10^{-19} \text{ м}^2/(\text{Н}\cdot\text{м})$. Така зміна в механічних властивостях матеріалу вказує на необхідність врахування температурних чинників при експлуатації фальцювальних планок, щоб забезпечити їх тривалу та ефективну роботу.

Нанесення мікрорельєфних напрямних на робочу поверхню фальцювальних планок може суттєво вплинути на температуру під час фальцювання розгортки обкладинок з хром-ерзацу. Для математичного аналізу цього процесу потрібно розглянути, як мікрорельєф впливає на тертя та тепловиділення. Початкові вхідні параметри для розрахунку, їх опис та механізми впливу наведено в табл. 3.

Ефективний коефіцієнт тертя

$$\mu_{\text{eff}} = \mu(1 - \beta),$$

де β — коефіцієнт, що враховує зменшення площі контакту через мікрорельєф.

Робота тертя $W_{\text{тр}} = \mu_{\text{eff}}Nd$.

Вплив на температуру фальцювальних планок після нанесення на їх робочу поверхню мікрорельєфних напрямних:

При зменшенні тертя

$$\Delta T_{\text{мікр}} = \frac{\mu_{\text{eff}}Nd}{mc}$$

Якщо $\mu_{\text{eff}} < \mu$, тоді $\Delta T_{\text{мікр}} < \Delta T$.
Покращене охолодження

$$\Delta T_{\text{охол}} = \frac{W_{\text{тр}}}{mck_{\text{охол}}}$$

де $k_{\text{охол}}$ — ефективна теплопровідність з урахуванням мікрорельєфу.

Припустимо, що нанесення мікрорельєфу зменшує коефіцієнт тертя на 20 % ($\beta = 0,2$), тоді:

Новий коефіцієнт тертя $\mu_{\text{eff}} = 0,5(1 - 0,2) = 0,4$.

Робота тертя $W_{\text{тр}} = 0,4 \times 50 \times 10 = 200 \text{ Дж}$.

Температурний підйом

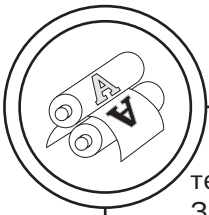
$$\Delta T = \frac{200 \text{ Дж}}{0,01 \text{ кг} \times 500 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К})} = 40 \text{ К}$$

Нанесення мікрорельєфу знижує коефіцієнт тертя, що призводить до зменшення роботи тертя і, відповідно, до зниження температури фальцювальних планок. Мікрорельєфні напрямні також сприяють покращеному відведенню тепла, що додатково знижує

Таблиця 3

Вхідні параметри та механізми впливу мікрорельєфних напрямних

Параметр	Опис	Механізм впливу
Коефіцієнт тертя (μ)	Змінює ефективний коефіцієнт тертя між планкою та картоном	Зменшує площу контакту, що знижує коефіцієнт тертя
Поверхнева площа контакту (S)	Зменшує або збільшує фактичну площу контакту	Поліпшує охолодження завдяки збільшенню площі теплопередачі
Теплопровідність (k)	Впливає на здатність матеріалу відводити тепло	Розподіляє механічні навантаження, що зменшує локальні перегриви



температуру робочої поверхні. Завдяки цьому зменшується ризик перегріву і виникнення можливих дефектів фальцювання. Таким чином, застосування мікрорельєфних напрямних на робочій поверхні фальцювальних планок є ефективним методом для зниження температури та покращення якості фальцювання обкладинок з хром-ерзацу. Це сприяє підвищенню загальної ефективності виробничого процесу, зменшенню витрат на технічне обслуговування та підвищенню довговічності фальцювальних планок.

Висновки

1. Виявлено вплив геометричних параметрів на зносостійкість профільних фальцювальних пластин. Профілі з евольвентною кривою забезпечують більш рівномірний розподіл напружень, що зменшує концентрацію напружень та підвищує довговічність пластин. Натомість профілі з осьовим вигином на 90° спричиняють високі значення концентрації напружень, що призводить до швидшого зносу та виникнення мікротріщин.
2. Досліджено методи мікрорельєфного зміцнення робочих

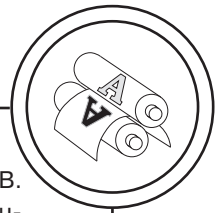
поверхонь профільних фальцювальних пластин, які показали високу ефективність у зниженні тертя та покращенні тепловідведення в процесі швидкісного фальцювання розгорток інтегральних обкладинок, що додатково знижує технологічну температуру пластин та підвищує їх зносостійкість.

3. Доведено засобами математичного моделювання, що зменшення коефіцієнта тертя та покращення теплопровідності сприяють більш рівномірному розподілу навантажень та знижують ризик локального перегріву профільних фальцювальних пластин, що запобігає утворенню технологічних дефектів у виготовленні інтегральних обкладинок.

4. Розроблено оптимізовані процедури та технічні рекомендації щодо геометрії профілю та методів зміцнення фальцювальних пластин. Ці рекомендації включають адаптацію технологічних параметрів, вибір відповідних матеріалів та оптимізацію послідовності виробничих операцій для забезпечення максимальної зносостійкості та тривалого використання фальцювальних пластин.

Список використаної літератури/References

1. Paliukh, O., Kyrychok, P., Trishchuk, R., Korobka, M., & Dziadyk, E. (2020). Defining technological features in the manufacture of semi-hard book covers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/1 (106), 80–90. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208798> [in English].
2. Son, W. C., Jong, Y. G., Pak, M. C., & Song, M. J. (2021). *Microstructure and wear resistance of Fe-Cr-C-Mo-VTi-N hardfacing layers*. Faculty of Materials Engineering, Kimchaek University of Technology, Pyongyang. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.11402>.
3. Zhang, G., Feng, A., Zhao, P., Pan, X., & Feng, H. (2023). Effect of Energy Density on the Microstructure and Wear Resistance of Nickel-Based WC Coatings by Laser Cladding of Preset Zr702 Alloy Plates. *Coatings*, 13, 826. <https://doi.org/10.3390/coatings13050826>.



4. Lesyk, D., Alnusirat, W., Dzhemelinskyi, V., Burmak, A., & Mordyuk, B. (2022). Influence of Multi-pin Ultrasonic Impact Treatment on Microrelief, Structure, and Residual Stress of AISI O2 Tool Steel. *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange*, 435–434. http://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_43.
5. Wang, C., Li, R., Bi, X., Yuan, W., Gu, J., Chen, J., Yan, M., & Zhang, Z. (January–February 2023). Microstructure and wear resistance property of laser clad CrCoNi coatings assisted by ultrasonic impact treatment. *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 22, 853–864. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.170>.
6. Xiao, J., Zhang, Y., Zhao, Z., Xie, X., & Liang, Z. (December 2023). Improved wear resistance of 440C steel ball via ultrasonic strengthening grinding process. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 322, 118198. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118198>.
7. Nilay, Ç., Melis, Y., & Hülya, D. (June 2023). Effect of solutionizing and quenching treatment on Ti6Al4V alloy: a study on wear, cavitation erosion and corrosion resistance. *Journal of Materials Science*, Vol. 58, Issue 24, 10201–10216. Retrieved from https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2023JMatS..5810201C/doi:10.1007/s10853-023-08688-w.
8. Sun, L., Huang, L., Wu, P., Huang, R., Fang, N., Xu, F., & Xu, K. (2023). Progress on the Effect and Mechanism of Ultrasonic Impact Treatment on Additive Manufactured Metal Fabrications. *Crystals*, 13(7), 995. <https://doi.org/10.3390/cryst13070995>.
9. Bhadauria, N., Pandey, S., & Pandey, P. M. (2020). Wear and enhancement of wear resistance — A review. *Materialstogay: proceedings*, Vol. 26, Part 2, 2986–2991. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.616>.
10. Wang, Y., Li, D., Nie, C., Gong, P., Yang, J., Hu, Z., Li, B., & Ma, M. (2023). Research Progress on the Wear Resistance of Key Components in Agricultural Machinery. *Materials*, 16(24), 7646. <https://doi.org/10.3390/ma16247646>.
11. Zha, X., Yuan, Z., Qin, H., Xi, L., Guo, B., Zhang, T., & Jiang, F. (2024). Coupling mechanisms of static and dynamic loads during the ultrasonic impact strengthening of Ti-6Al-4V/X Zha. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-023-11676-8>.

The research object is the processes of forming profile geometry and micro-relief strengthening, which affect the wear resistance of plates for folding integral covers. Analytical and experimental studies are based on the development of a simulation model of the wear process of folding plates, which allows a detailed examination of various factors affecting their durability and wear resistance.

Keywords: micro-relief guides; point forming; profile geometry; folding plates.

Надійшла до редакції 26.02.24