

УДК 686.1.023.2

DOI: 10.20535/2077-7264.4(82).2023.299085

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

## АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФЕКТІВ МІКРОРЕЛЬЄФНОГО ЗМІЦНЕННЯ ФАЛЬЦЮВАЛЬНИХ ПЛАСТИН ПРИ ФОРМУВАННІ ПРОФІЛЮ

Об'єктом дослідження є процеси мікрорельєфного зміцнення фальцювальних пластин, які підлягають подальшому формуванню профілю. Встановлено динаміку виникнення дефектів зміцненої робочої поверхні пластин з ідентифікацією моментів виникнення дефектів.

Розглянуто поширені методи поверхневого зміцнення, серед яких технології хімічного та фізичного осадження, механічної та лазерної обробки, іонне імплантування та термічна обробка, з метою визначення їх впливу на мікроструктуру поверхні та геометрію профілю пластин. Досліджено взаємодію між зміцненим шаром та матеріалами обкладинок, з метою виявлення оптимальних параметрів фальцювання без ризику пошкодження обкладинок.

**Ключові слова:** мікрорельєфне зміцнення; фальцювальні пластини; формування профілю; технологічні параметри; дефекти покриття; експериментальне моделювання.

### Вступ

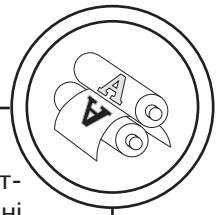
У сучасному брошурувально-палітурному виробництві фальцювальні пластини із заданим профілем є структурними елементами технологічних ліній, що забезпечують дотримання вимог галузевих стандартів до формування складних елементів розгортки обкладинок в процесі виготовлення їх завершених видів.

Ці пластини розроблено для забезпечення відповідності точним геометричним параметрам розгортки, мінімізуючи ризик пош-

коджень матеріалу та забезпечуючи рівномірне приклеювання клапанів завдяки спеціалізованим профілям, що знижують зональний тиск на матеріал.

Оптимізація процесу фальцювання за допомогою пластин із заданим профілем дозволяє підвищити продуктивність, особливо в умовах масового виробництва, та сприяє високій якості фальцювання різноманітних палітурних матеріалів.

Проте, інтенсивне використання пластин у процесі швидкісно-



го фальцювання розгорток обкладинок, зокрема постійне тертя матеріалу обкладинок по їх профільній робочій поверхні, призводить до прискореного зносу цих поверхонь. Це підкреслює необхідність систематичного технічного обслуговування — просторового регулювання пластин із врахуванням зносу, та своєчасної їх заміни для забезпечення безперебійності та високої якості виробничого процесу.

Застосування технологій зміцнення поверхневого шару пластин сприятиме продовженню їхнього терміну служби та зменшенню частоти обслуговування. Застосування різноманітних технологій для виготовлення фальцювальних пластин із заданим профілем, особливо тих, що включають зміцнення поверхні через створення мікрорельєфних напрямних, вносить певні ризики, зокрема розбіжності між очікуваними властивостями та фактичними результатами.

Неоднорідність мікрорельєфу може призвести до нерівномірного тиску під час фальцювання, що негативно позначається на якості згину та може спотворювати обкладинки. Крім того, неправильний вибір матеріалів або помилки в технологічному процесі можуть спричинити прискорений знос мікрорельєфу, що скорочує життєвий цикл пластин.

Точність виготовлення мікрорельєфних структур потребує використання спеціалізованого обладнання та високої кваліфікації персоналу, а будь-які помилки в цьому процесі можуть призвести до дефектів, збільшуючи виробничі витрати. Додатково, ці технології можуть істотно

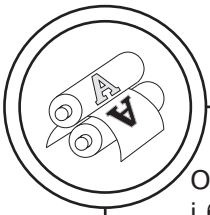
підвищити вартість виробництва через потребу в застосуванні спеціалізованого обладнання та дорогих матеріалів.

Варто також враховувати, що мікрорельєф робочої поверхні фальцювальних пластин може бути не однаково ефективним для всіх видів паперу або картону виготовлення обкладинок, що вимагає попередньої профільної та зміцнювальної адаптації пластин під визначені матеріали, щоб запобігти їх пошкодженню. Отже, аналіз цих ризиків та розроблення стратегій для їх мінімізації є важливими для забезпечення ефективності та надійності виробничого процесу виготовлення інтегральних обкладинок та застосування фальцювальних пластин із заданим профілем.

### **Постановка проблеми**

Розвиток технологій зміцнення поверхневого шару фальцювальних пластин із заданим профілем є важливим напрямом у вдосконаленні деталей поліграфічного обладнання, оскільки це значно підвищує їхню зносостійкість та тривалість експлуатації. Використання інноваційних матеріалів і технологічних рішень для підсилення поверхні дозволяє не лише продовжити термін служби фальцювальних пластин, але й забезпечити високу точність та якість фальцювання при виготовленні інтегральних обкладинок високої якості.

Зміцнення поверхневого шару фальцювальних пластин не тільки підвищує їх зносостійкість та корозійну стійкість, але й оптимізує їх робочі характеристики за різних експлуатаційних умов.



Однак, цей процес є складним і багатоетапним, вимагає виявлення взаємозв'язків між технологічними параметрами, властивостями використовуваних матеріалів та завершальними характеристиками поліграфічного виробу.

Структурними аспектами в застосуванні технологій поверхневого зміцнення механізмів поліграфічного обладнання є вибір оптимальних матеріалів для зміцнення, розробка ефективних технологічних процесів та методів обробки, а також точне моделювання процесів взаємодії між зміцнювальними засобами та поверхнею фальцювальних пластин. Ефективність таких технологій безпосередньо впливає на стабільність роботи обладнання та якість кінцевого продукту.

Особливу увагу в процесі формування фальцювальних пластин варто приділити не лише послідовності механічного створення фальцювального профілю, але й вибіркового застосуванню передових зміцнювальних технологій поверхневого шару робочої частини пластин. Це сприятиме цілісності та довговічності мікропрофілю зміцненої поверхні, запобігаючи його передчасному зносу або руйнуванню під час інтенсивної експлуатації.

Наукові дослідження в цій області можливо також зосередити на застосуванні нових композитних матеріалів та нанотехнологій, які можуть бути інтегровані у виробництво фальцювальних пластин для подальшого покращення їхніх експлуатаційних характеристик. Вивчення впливу різних видів механічної обробки поверхні, включно з лазерною об-

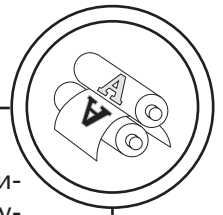
робкою, дозволить ідентифікувати оптимальні методи для забезпечення максимальної зносостійкості та мінімального тертя під час фальцювання.

Такі інноваційні підходи не тільки продовжать термін служби фальцювальних пластин, але й сприятимуть підвищенню якості кінцевої друкованої продукції, зменшуючи ризик пошкодження паперу та інших матеріалів під час фальцювання. Крім того, інтеграція цих технологій може сприяти розвитку більш екологічних та економічно ефективних виробничих процесів, що є важливим аспектом у сучасному виробництві.

### **Аналіз попередніх досліджень**

У дослідженні [1] розроблено математичну модель, що описує динаміку створення регулярного мікрорельєфу за допомогою цілеспрямованої сили, що змінює своє положення відносно деталі. Використання програми Maple дозволило моделювати 3D-зміни крутильних кутів для аналізу поведінки довгих циліндричних деталей під час експлуатації. Попри коректне використання математичних методів та алгоритмів для реалізації, не проведено аналіз ефекту мікрорельєфу на функціональні характеристики зміцненого поверхневого шару, включаючи його вплив на зниження коефіцієнта тертя та покращення корозійної стійкості.

Ціль дослідження [2] полягає у детальному описі інтегрованої технології, яка об'єднує вібраційну обробку з хромуванням для створення зміцненого мікрорельєфу на поверхні друкарських циліндрів, сприяючи тим самим під-



вищенню їхніх експлуатаційних властивостей. Експериментальні результати демонструють, що інтегроване використання цих методів значно збільшує твердість і мікротвердість поверхні циліндрів. Однак, попри переваги цього методу, досі не розглянуто, як параметри вібраційної обробки та хромування впливають на точне формування мікропрофілю.

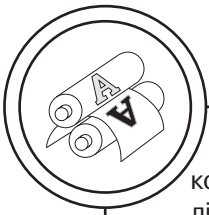
Автори дослідження [3] аналізують процес іонного азотування аустенітної сталі 316L, яка застосовується у виробництві профільних фальцювальних пластин. Основна увага приділена розробці новітнього методу, що використовує активне сито для значного підвищення ефективності азотування. В статті представлено інноваційний механізм іонізувального азотування із застосуванням активного екрана, що сприяє інтенсифікації дифузії азоту в структуру сталі. Хоча отримані результати мають значний практичний інтерес, все ж залишається невивченим аспект аналітичного моделювання мікроструктурних трансформацій в аустенітній сталі 316L, викликаних процесом іонного азотування, та їхнього впливу на формування та властивості мікрорельєфу зміцненого шару.

Дослідження [4] демонструє вплив лазерної ударної обробки (LSP) на аустенітну нержавіючу сталь 304L, у підвищенні її стійкості проти точкової корозії. Встановлено, що інтенсивне застосування LSP призводить до значного збільшення залишкових напружень стиснення та витончення зернової структури на поверхні сталі. Ці зміни в мікроструктурі та морфології поверхні забезпечують підвищену корозійну стій-

кість, мінімізуючи можливість виникнення мікротріщин та формуючи щільніший захисний шар оксиду  $Cr_2O_3$ , що покращує пасивні властивості матеріалу. Попри значні переваги представленої технології зміцнення, залишається відкритим питання про вплив параметрів лазерної ударної обробки (LSP) на формування мікрорельєфу, а також не розроблені оптимальні методики, що дозволили б мінімізувати дефекти та оптимізувати процес формування профілю для досягнення вищої якості.

Метою наступної роботи [5] є аналіз та порівняльний огляд сучасних методів поверхневого зміцнення компонентів машин за допомогою нанесення металевих електрохімічних хромових та оксидних покриттів для оптимізації їхніх експлуатаційних характеристик. У дослідженні застосовано комплексний підхід до вивчення процесів нанесення таких покриттів, в тому числі методів анодування та плазмоелектролітичного оксидування на різноманітні металеві поверхні. Проте, дослідження не включає аналіз потенційних мікроструктурних дефектів, що можуть утворитися під час процесу зміцнення, особливо в контексті фальцювальних пластин, та їх впливу на точність та якість профілювання.

В матеріалах статті [6] розглянуто технології зміцнення поверхонь деталей машин за допомогою поверхнево-пластичної деформації, акцентуючи на вібраційному методі, що включає динамічний вплив мікроударів на деталь. Цей процес утворює мікрорельєф, який не тільки знижує коефіцієнт тертя між рухомими



компонентами у 1,6–2,2 рази, поліпшуючи їхню плавність роботи, але й підвищує зносостійкість з'єднань, подвоюючи їхній термін служби. Проте, варто підкреслити, що це дослідження не охоплює аналіз впливу вібраційної обробки на розподіл залишкових напружень і наскільки ці напруження впливають на точність та якість сформованого профілю.

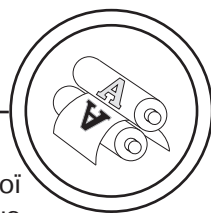
Детальний аналіз обмежень [7], пов'язаних з вібраційною зміцнювальною обробкою, представлено у дослідженні, яке фокусується на вивченні впливу цієї технології на реставрацію машинних деталей, схильних до абразивного зношування. В ході аналізу оцінено зносостійкість і експлуатаційну надійність робочих елементів після застосування вібраційної обробки. Отримані результати демонструють істотне зменшення зносу та подовження терміну служби машинних компонентів, що були відновлені та зміцнені за допомогою вібраційного методу.

У наступному дослідженні [8] аналізуються техніки поверхневого зміцнення компонентів машин за допомогою методів електроімпульсного вигладжування з модифікацією та алюмотермічної обробки. Виявлено, що електроімпульсне вигладжування підвищує зносостійкість у 1,8 рази, тоді як алюмотермія збільшує її вдвічі. Аналогічно, інтенсивність зношування знижується в 1,6 рази після електроімпульсної обробки та в 1,8 рази після алюмотермії. Однак, попри високу практичну цінність отриманих результатів, в дослідженні недостатньо уваги приділено аналізу взаємодії між параметрами вказаних процесів та появою дефектів на поверхні компонентів.

У статті [9] розглядається використання технології лазерного наплавлення для відновлення та зміцнення деталей машин, що дозволяє ефективно реагувати на поширені проблеми зносу, деформації та корозії. Застосування цієї технології значно підвищує твердість поверхні та знижує втрати від зносу. Однак, в роботі відсутні дослідження, спрямовані на визначення оптимальних параметрів лазерного наплавлення, що необхідно для мінімізації поверхневих дефектів та забезпечення рівномірного мікрорельєфного зміцнення на фальцювальних пластинах.

У матеріалах досліджень [10] аналізується ефективність інтегрованої термодереформаційної обробки, що поєднує дробоструминну обробку з наступною лазерною термообробкою, з метою підвищення міцності та тривалості служби металевих компонентів. Застосування цього підходу демонструє значне покращення як глибини, так і твердості зміцненого шару, що досягається завдяки ретельній оптимізації параметрів обох видів обробки. Проте, у роботі не розглядаються дослідження оптимізації цих процесів для застосування у виробництві фальцювальних пластин, що могло б допомогти уникнути потенційних дефектів та підвищити ефективність формування мікрорельєфу.

Аналіз сучасних досліджень в області поверхневого зміцнення вказує на значний прогрес у вдосконаленні технологій, спрямованих на підвищення експлуатаційних характеристик деталей, в тому числі профільних фальцювальних пластин, які відіграють важливу



роль у виготовленні інтегральних обкладинок. Розробка нових методів і вдосконалення наявних процесів зміцнення спрямована на збільшення міцності, довговічності та корозійної стійкості оброблених поверхонь. Актуальними напрямками досліджень є оптимізація технологічних параметрів для забезпечення якості й однорідності мікрорельєфного шару, що безпосередньо впливає на функціональні властивості фальцювальних пластин. Важливе значення має аналітичне моделювання мікроструктурних змін, що відбуваються внаслідок зміцнення, та вивчення їхнього впливу на зносостійкість та корозійну стійкість. Для досягнення оптимальних результатів важливою є розробка комплексних рішень, що дозволяють інтегрувати різноманітні процеси зміцнення, враховуючи їхню взаємозалежність і комплексний вплив на властивості зміцнених поверхонь.

### Мета роботи

Аналітичне дослідження спрямовано на виявлення причин та чинників виникнення дефектів мікрорельєфного зміцнювального поверхневого шару плоских фальцювальних пластин в процесі подальшого механічного формування у заданий профіль. Це дозволить розробити оптимізовані процедури та технічні рекомендації, спрямовані на мінімізацію дефектів та покращення якості робочої поверхні профільних фальцювальних пластин. Завдання дослідження включають:

— аналіз етапів створення мікрорельєфного зміцнення на плоских пластинах, включаючи вибір матеріалів, технологічні параметри зміцнення та методики обробки;

— вивчення впливу механічної обробки на зміцнену поверхню пластин при їх формуванні в фальцювальний профіль з ідентифікацією моментів виникнення дефектів;

— експериментальне моделювання та аналіз процесів, що спричиняють порушення цілісності мікрорельєфу під час механічної обробки, з метою визначення критичних впливів та параметрів;

— оптимізацію послідовності виробничих операцій та технічних умов, що дозволяють зберегти інтегральність мікрорельєфу та якість поверхні після формування профілю.

### Результати проведених досліджень

Процес створення інтегральних обкладинок для книг передбачає використання високотехнологічних методів та матеріалів, зокрема, вибір якісного картону хром-ерзац, що забезпечує міцність та довговічність виробу. Конструкція обкладинки складається з двох основних елементів: передньої та задньої частин, розташованих відповідно до їхнього місця у книзі, а також корінцевої частини, розміщеної між ними [11]. Додатково, обкладинка містить два бокових клапани, розміри яких зіставні з розмірами передньої та задньої частин у розгорнутому стані, а також верхні та нижні крайки (рис. 1).

Для надання обкладинці додаткової міцності та об'єму, вона виготовляється двошаровою. Процес полягає у нанесенні клею на бокові клапани та крайки, після чого розгорнута обкладинка з клеєм на клапанах та крайках переміщується через систему стаціонарних



профільних фальцювальних пластин. Ці пластини, розташовані на певних ділянках шляху руху обкладинки, поступово згинають клапани та приклеюють їх до основної частини обкладинки, формуючи таким чином її кінцевий вигляд.

Для забезпечення однорідності та високої якості виробничого процесу, у фальцювальній механізмі інтегровані фальцювальні пластини із заданим профілем (рис. 1, поз. 4<sub>л</sub>, 4<sub>п</sub>). Вони дозволяють здійснювати точно та рівномірне фальцювання та приклеювання клапанів, гарантуючи високу якість готової обкладинки.

Спеціалізовані пластини з просторовою профільною геометрією забезпечують стабільність результатів у виробництві й мінімізують ризики пошкодження папірних матеріалів для виготовлення обкладинок, знижуючи витрати через зменшення браку.

Застосування профільних пластин сприяє підвищенню продуктивності та ефективності фальцювання, що має значення при масовому виробництві. Ці пластини можуть бути адаптовані до різних типів матеріалів, забезпечуючи виробничу гнучкість та можливість виробництва різноманітної книжково-журнальної продукції.

Фальцювання клапанів інтегральних обкладинок може бути виконане за допомогою різних типів фальцювальних пластин із заданим профілем, кожен з яких має свої особливості та переваги (табл.).

Вибір типу пластин залежить від проектних вимог дизайну обкладинки, типу матеріалу, який використовується, та розрахованої точності згинів. Однак, важливим чинником довготривалого використання профільних фальцювальних пластин є застосування мікрорельєфного зміцнення

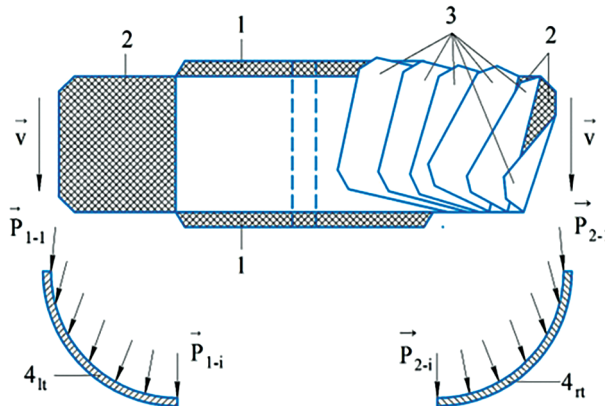
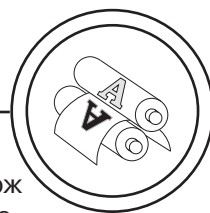


Рис. 1. Технологічна схема фальцювання клапанів інтегральних обкладинок пластинами із заданим профілем, 1, 2 — крайки та клапани з шаром клею, 3 — етапи профільного фальцювання, 4<sub>л</sub>, 4<sub>п</sub> — профільні пластини,

$\vec{P}_{1-i}$ ,  $\vec{P}_{1-i}$ ,  $\vec{P}_{2-i}$ ,  $\vec{P}_{2-i}$  — зусилля в зоні фальцювального контакту,  $\vec{v}$  — напрям та швидкість фальцювання



робочих поверхонь, що забезпечує збільшену стійкість до зносу під час безперервного фальцювання та склеювання деталей розгорток інтегральних обкладинок.

Таке підвищення довговічності дозволяє зменшити частоту заміни пластин, знизити витрати на обслуговування та заміну обладнання. До того ж мікрорельєфна поверхня забезпечує краще зчеплення з матеріалом обкладинок, зменшує ризик утворення згинів з відхиленнями та пошкоджень матеріалу. Зміцнювальний мікрорельєф сприяє однорідному розподілу тиску та навантаження під час фальцювання як на клапани обкладинок, так і на поверхню пластин, що забезпечує стабільність процесу та зменшує ризик виникнення дефектів виробництва.

Поверхнєве зміцнення також дозволяє фальцювальним пластинам ефективно працювати з широким спектром матеріалів обкладинок, включаючи ті, що мають високу щільність або специфічні властивості, що розширює можливості застосування обладнання. Нарешті, поліпшення ковзання матеріалу обкладинок по зміцненій поверхні фальцювальних пластин сприяє зниженню витрат енергії під час виробництва, що робить процес більш енергоефективним та екологічно сталим. Таким чином, поверхнєве мікрорельєфне зміцнення робочої поверхні фальцювальних пластин не тільки подовжує їх експлуатаційний термін, але й значно підвищує ефективність та якість фальцювально-склеювальних процесів, що є важливим

Вибірка типів фальцювальних пластин із заданим профілем

	Типи пластин	Особливості	Переваги
1	Прямолінійні (стандартні)	Простий прямокутний або лінійний профіль; для створення стандартних згинів	Простота використання, для стандартних дизайнів; менші витрати на виробництво та обслуговування
2	Конічні	Профіль, який звужується до одного кінця; створення згинів зі змінною глибиною	Гнучкість у створенні згинів з різною глибиною; для складних дизайнів
3	Евольвентні	Криволінійний профіль, для створення плавних, рівномірних згинів на обкладинках зі складними формами	Висока точність згинів, мінімізують ризик пошкодження матеріалу; для складних дизайнів
4	З регульованим кутом згину	Можливість регулювання кута згину згідно з потребами	Висока гнучкість у використанні; створення згинів з різними кутами на одній і тій же обкладинці
5	З інтегрованими нагрівальними елементами	Оснащені нагрівальними елементами для полегшення процесу фальцювання жорстких або товстих матеріалів	Для фальцювання товстих або жорстких матеріалів; забезпечують чіткі та точні згини
6	Комбіновані з регульованою довжиною	Налаштування довжини фальцювання відповідно до змінних розмірів розгорток обкладинок	Універсальність застосування





для поліпшення продуктивності та конкурентоспроможності поліграфічного виробництва.

Враховуючи, що структура фальцювальної пластини є однорідною, для її виготовлення вибирається метал з проєктованими властивостями. На одній з плоских поверхонь пластини проводиться технологічне зміцнення поверхневого шару за допомогою нанесення мікрорельєфних напрямних (рис. 2, а) за наступними показниками:  $t_1$  — товщина пластини,  $t_2$  — глибина мікрорельєфних заглибин,  $b$  — ширина мікрорельєфних напрямних,  $2b$  — відстань між напрямними. Це забезпечує надійний контакт з клапанами інтегральних обкладинок під час їх фальцювання та приклеювання до основи.

Наступним є технологічний процес формування заданого профілю (рис. 2, в) з плоскої пластини з одностороннім поверхневим зміцненням. Для утворення заданого фальцювального профілю пластина піддається деформуванню вздовж осі пластини  $O-O_1$  (рис. 2, б) методом осьового скручування на просторовий кут  $90^\circ$  між короткими сторонами АБ і ВГ. Коротку сторону пластини АБ затиснуто в нерухомому затискачі (4), а іншу сторону ВГ у рухомому (поворотному) затискачі (5) і повернуто на кут  $90^\circ$ .

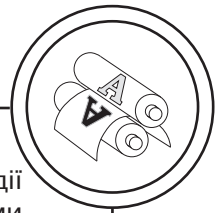
Розглянуто процес деформування фальцювальної пластини та потенційне руйнування зміцненого поверхневого шару під час формування заданого профілю (рис. 2, г), зважаючи на особливості властивостей матеріалу пластини та характеристики нанесеного мікрорельєфного шару. Початково, однорідна структура

металу (нержавіюча сталь марки 316L, за класифікацією міжнародного стандарту *AISI (American Iron and Steel Institute)* США [12], з якого виготовлено фальцювальну пластину, забезпечує їй певний рівень міцності та пластичності, що дозволяє виконувати деформацію без значних пошкоджень.

Під час осьового скручування пластини, внутрішні напруження в матеріалі розподіляються нерівномірно, з максимальним навантаженням у зонах зміни профілю. Зміцнений поверхневий шар, оброблений для створення мікрорельєфних напрямних, хоча й збільшує абразивну стійкість та механічну міцність пластини, може мати меншу гнучкість порівняно з основним матеріалом пластини. Це створює ризик утворення тріщин або розшарування у місцях найбільшого напруження. Напруження зсуву та вигину зосереджуються переважно у зонах максимальної кривини.

Технологічний процес нанесення мікрорельєфних напрямних оптимізовано таким чином, щоб забезпечити не лише зовнішню міцність, але й зберегти внутрішню пластичність матеріалу, знижуючи ризик руйнування під час деформації. Окрім того, спосіб осьового скручування вимагає високої точності та контролю, щоб мінімізувати внутрішні напруги та запобігти пошкодженню як основного матеріалу пластини, так і зміцненого шару.

У процесі розробки та виробництва фальцювальних пластин важливо враховувати ці аспекти, щоб забезпечити оптимальний баланс між міцністю та гнучкістю матеріалу, що дозволить уникнути руйнування під час формуван-



ня профілю та забезпечить тривалу функціональність інструменту.

Процес деформації пластин та механізм пошкодження зміцнених поверхонь під час формування профілю з плоских вихідних

матеріалів вимагає взаємодії між матеріалом і прикладеними силами. Під час скручування кінців пластини на кут  $90^\circ$ , зокрема на зміцнених мікрорельєфних напрямних, виникають складні

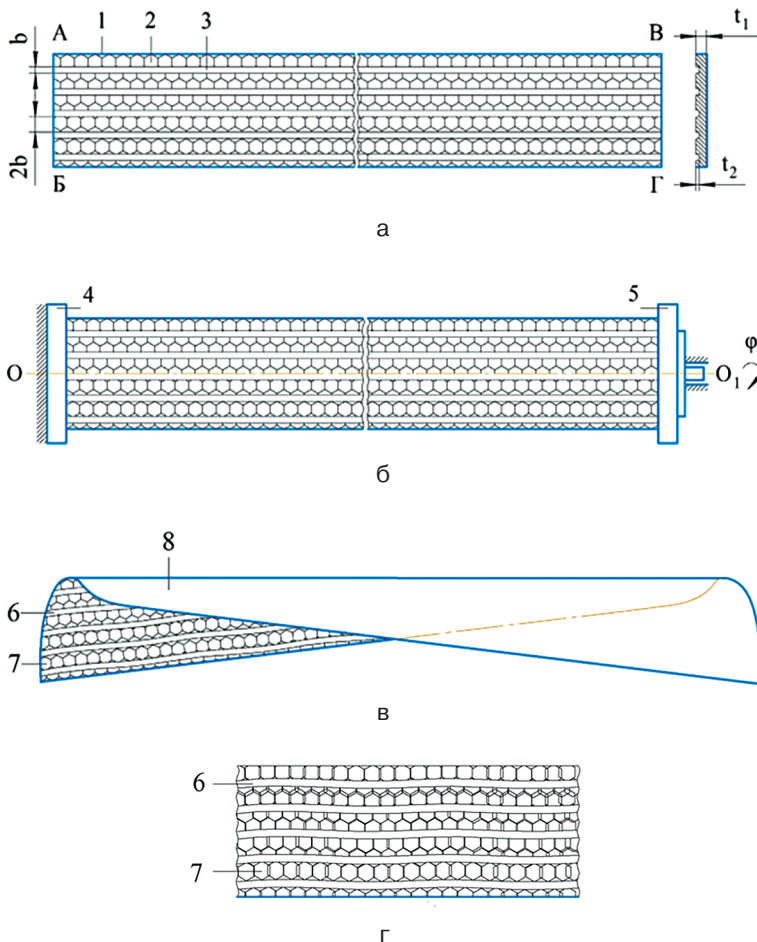


Рис. 2. Етапи утворення дефектів мікрорельєфу фальцювальних пластин із заданим профілем, а — плоска пластина з мікрорельєфом, б — формування заданого профілю, в — дефекти мікрорельєфу після формування профілю, г — фрагмент пластини (збільшено) з дефектами мікрорельєфу, 1 — пластина, 2 — гексагональний мікрорельєф, 3 — мікрорельєфні напрямні, 4 — нерухомий затискач, 5 — рухомий (поворотний) затискач, 6 — дефекти мікрорельєфних напрямних, 7 — зміни в гексагональній побудові мікрорельєфу, 8 — пластина із заданим профілем,  $t_1$  — товщина пластини,  $t_2$  — мікрорельєфні заглибини,  $b$  — ширина мікрорельєфних напрямних,  $2b$  — відстань між напрямними



напруження. Ці напруження включають сили зсуву та вигину, які можуть перевищувати межу міцності як самої пластини, так і нанесених на неї мікрорельєфних напрямних.

Тому, важливо використовувати комплексний підхід до моделювання цих процесів, що включає застосування числових методів та комп'ютерного моделювання. Це дозволить більш точно прогнозувати поведінку матеріалу під час деформації та визначити оптимальні умови процесу з метою мінімізації ризику руйнування та забезпечення високої якості профільних фальцювальних пластин.

Для запобігання або мінімізації руйнування зміцненого шару можуть бути використані спеціальні технології та матеріали, які забезпечують вищу пластичність та адгезію мікрорельєфних напрямних до основи металу пластини. Також важливим є правильний вибір технологічних параметрів процесу осьового скручування, зокрема, контроль швидкості та радіусу кривини, для зменшення ризику пошкодження.

Для опису деформації пластини та зміцненого поверхневого шару під час осьового скручування, застосовано формули з теорії пружності та пластичності. Однак слід зазначити, що поведінка композитного матеріалу, такого як пластина з основою та зміцненим поверхневим шаром, може бути складною через різницю в механічних властивостях шарів.

Деформація основи пластини:  
Напруження вигину:

$$\sigma_b = \frac{M}{I} y, \quad (1)$$

де  $M$  — момент, що діє на пластину,  $I$  — момент інерції перетину пластини,  $y$  — відстань від нейтральної осі до точки, в якій розраховується напруження.

Деформація вигину:

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E}, \quad (2)$$

де  $E$  — модуль Юнга матеріалу пластини.

Деформація зміцненого поверхневого шару:

Напруження зсуву:

$$\tau = \frac{VQ}{Ib}, \quad (3)$$

де  $V$  — поперечна сила, що діє на пластину,  $Q$  — статичний момент перетину,  $b$  — ширина перетину в точці, де розраховується напруження.

Деформація зсуву:

$$\gamma = \frac{\tau}{G}, \quad (4)$$

де  $G$  — модуль зсуву матеріалу поверхневого шару.

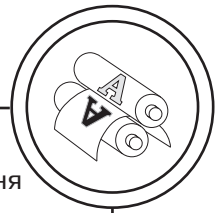
Деформація в об'єднувальній зоні між основою та зміцненим шаром:

Композитна деформація:

$$\varepsilon_c = \alpha \varepsilon_b + (1 - \alpha) \gamma, \quad (5)$$

де  $\alpha$  — коефіцієнт, що визначає складові деформації вигину та зсуву в загальну деформацію об'єднувальної зони.

Для виведення диференціального рівняння композитної деформації фальцювальної пластини зі зміцненим поверхневим шаром необхідно розглянути деформації як функції від координат, наприклад, вздовж довжини пластини  $x$ . Тоді деформації вигину



та зсуву можуть бути представлені як  $\varepsilon_b(x)$  та  $\gamma(x)$  відповідно. Припустимо, що  $\alpha$  залишається константою по всій довжині пластини, тоді диференціальна форма рівняння композитної деформації може бути записана як:

$$\frac{d\varepsilon_c}{dx} = \alpha \frac{d\varepsilon_b}{dx} + (1-\alpha) \frac{d\gamma}{dx} \quad (6)$$

Тут  $\frac{d\varepsilon_b}{dx}$  та  $\frac{d\gamma}{dx}$  — це диференціальні вирази для деформацій вигину та зсуву відповідно, які залежать від розподілу напружень та механічних властивостей матеріалу вздовж пластини.

Це диференціальне рівняння може бути використане для аналізу зміни композитної деформації вздовж пластини, але для його розв'язку необхідно знати конкретні вирази для  $\frac{d\varepsilon_b}{dx}$  та  $\frac{d\gamma}{dx}$ , а також граничні умови для пластини.

Для випадку, коли  $\alpha$  не є константою, а збільшується в центрі пластини, де складові деформації вигину є найбільшими, тоді необхідно врахувати цю залежність  $\alpha$  від позиції вздовж пластини. Припустимо, що  $\alpha(x)$  змінюється відповідно до визначеної функції позиції  $x$ , де  $x = 0$  відповідає центру пластини.

Тоді рівняння для композитної деформації, яке враховує просторову залежність  $\alpha$ , можна представити у виді:

$$\varepsilon_c(x) = \alpha(x)\varepsilon_b(x) + [1 - \alpha(x)]\gamma(x) \quad (7)$$

Диференціюючи це рівняння по  $x$ , отримуємо:

$$\frac{d\varepsilon_c}{dx} = \frac{d}{dx}[\alpha(x)\varepsilon_b(x)] + \frac{d}{dx}[(1-\alpha(x))\gamma(x)] \quad (8)$$

Застосовуючи правило диференціювання добутку, маємо:

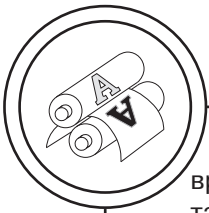
$$\frac{d\varepsilon_c}{dx} = \frac{d\alpha}{dx}\varepsilon_b(x) + \alpha(x)\frac{d\varepsilon_b}{dx} - \frac{d\alpha}{dx}\gamma(x) + (1-\alpha(x))\frac{d\gamma}{dx} \quad (9)$$

Це рівняння враховує змінність  $\alpha$  вздовж пластини й описує, як композитна деформація залежить від змін у складових деформацій вигину та зсуву в різних точках пластини. Такий підхід дозволяє більш точно аналізувати деформацію в умовах, коли складові деформації не є однорідними по всій довжині пластини.

Для розв'язання цього диференціального рівняння необхідно знати конкретну функціональну форму  $\alpha(x)$ , а також мати вирази для  $\varepsilon_b(x)$  та  $\gamma(x)$  та відповідні граничні умови. Для прикладного методу розв'язання введено припущення, що  $\alpha(x)$  зростає лінійно від країв до центру пластини, де  $\alpha(0) = \alpha_{\max}$ , і зменшується до  $\alpha(L/2) = \alpha_{\min}$  на краях, де  $L$  — довжина пластини, а деформація вигину  $\varepsilon_b(x)$  і деформація зсуву  $\gamma(x)$  є константами для спрощення.

Відтак можна припустити, що  $\alpha(x) = \alpha_{\max} - \beta|x|$ , де  $\beta$  — константа, що визначає швидкість зменшення  $\alpha$  від центру до країв, і  $x$  — відстань від центру пластини.

Підставляючи ці припущення в диференціальне рівняння (9) і



враховуючи, що  $\varepsilon_b$  і  $\gamma$  є константами, отримуємо:

$$\frac{d\varepsilon_c}{dx} = \frac{d\alpha}{dx}(\varepsilon_b - \gamma). \quad (10)$$

Оскільки  $\frac{d\alpha}{dx} = -\beta$  для  $x > 0$  і

$\frac{d\alpha}{dx} = \beta$  для  $x < 0$ , інтегруючи це рівняння, отримаємо:

$$\varepsilon_c(x) = -\beta(\varepsilon_b - \gamma)|x| + C, \quad (11)$$

де  $C$  — константа інтегрування, що визначається з граничних умов.

Для чисельного розв'язання можна використати програмне забезпечення, таке як MATLAB, Python (з бібліотекою NumPy або SciPy), або спеціалізоване програмне забезпечення для розв'язання диференціальних рівнянь. Процес зазвичай включає дискретизацію області  $x$ , задання початкових і граничних умов, вибір чисельного методу для розв'язання (наприклад, метод Ейлера, метод Рунге-Кутти тощо) та аналіз отриманих результатів.

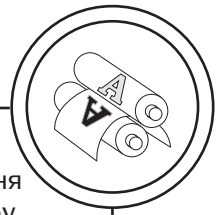
Для запобігання або мінімізації руйнування зміцненого шару можуть бути використані спеціальні технології та матеріали, які забезпечують вищу пластичність та адгезію мікрорельєфних напрямних до основи металу пластини. Також важливим є правильний вибір технологічних параметрів процесу формування заданого фальцювального профілю, зокрема, контроль швидкості та радіуса кривини, для зменшення ризику пошкодження.

Враховуючи, що попереднє зміцнювальне нанесення мікрорельє-

фу на поверхню фальцювальної пластини й подальше формування заданого фальцювального профілю призводить до часткового спотворення, або руйнації мікропрофілю, можливо застосувати інший порядок технологічних операцій або модифікувати наявні процеси. Спершу формується основний профіль фальцювальної пластини, після чого на нього наноситься мікрорельєф, що запобігає його пошкодженню під час профілювання. Застосування технологій з мінімальним механічним впливом, включаючи лазерне формування або водоструменеву обробку, під час профілювання пластин знижує ризик пошкодження мікрорельєфу.

Аддитивні технології, такі як 3D-друк чи лазерне спікання, дозволяють наносити мікрорельєф на профіль пластини з мінімальним механічним впливом на поверхню. Термічна або хімічна обробка, включно з термічним оксидуванням, хімічним травленням або анодуванням, використовується після формування профілю для створення мікрорельєфу без механічного впливу на поверхню. Гнучкі технології, як-от гідравлічне чи пневматичне формування, забезпечують точний контроль сили та тиску при профілюванні, мінімізуючи ризик пошкодження мікрорельєфу. Оптимізація параметрів формування, включно з температурою, швидкістю, тиском та часом впливу, суттєво знижує ризик пошкодження мікрорельєфу.

Застосування цих підходів або їх комбінації дозволить оптимізувати технологічні процеси для виготовлення фальцювальних пластин із заданим профілем,



зберігаючи при цьому інтегральність та якість мікрорельєфу на поверхні робочої площини пластин. Отже, існують два основні методи для виробництва фальцювальних пластин зі зміцненим поверхневим мікрорельєфним шаром. В першому методі, мікрорельєф спочатку наноситься на плоску пластину, після чого пластина піддається просторовій деформації для отримання необхідного профілю. Натомість другий метод передбачає первинне формування профілю пластини, за яким слідує нанесення мікрорельєфу на заздалегідь профільовану поверхню.

Важливим є аналіз цих підходів, з огляду на економічну ефективність, технічні переваги та можливі обмеження для вибору оптимальної стратегії виробництва. Цей аналіз повинен враховувати не лише безпосередні витрати та вигоди, а й потенційний вплив кожного методу на якість кінцевого продукту, його довговічність та задоволення технологічних вимог до виробу.

Економічна доцільність першого технологічного методу виготовлення фальцювальних пластин (спочатку нанесення мікрорельєфу, потім профільна деформація) може бути вищою у короткотерміновій, оскільки нанесення мікрорельєфу на плоску поверхню є менш складним та дешевшим процесом. Однак, подальша деформація може призвести до збільшення витрат через втрату матеріалу або необхідність повторного нанесення мікрорельєфу на пошкоджені ділянки.

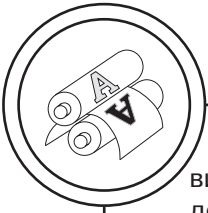
До переваг цього методу можливо віднести простішу ініціальну обробку та можливість викорис-

тання стандартного обладнання для нанесення мікрорельєфу. До недоліків — високий ризик пошкодження мікрорельєфу під час деформації, що може вимагати додаткових витрат на виправлення або повторне нанесення мікрорельєфу.

Економічна доцільність другого методу (спочатку профільовання, потім мікрорельєф) може бути вищою у довгостроковій перспективі, оскільки мінімізується ризик пошкодження мікрорельєфу та витрат на його відновлення. Однак, початкові витрати можуть бути вищими через необхідність спеціалізованого обладнання або технологій для нанесення мікрорельєфу на вже сформований профіль.

Перевагами цього методу є зниження ризику пошкодження мікрорельєфу, вища якість кінцевого продукту, можливість контролювати якість нанесення мікрорельєфу на складні профілі. Недоліками — вищі вимоги до точності та контролю процесу нанесення мікрорельєфу, потенційно вищі початкові капітальні витрати на обладнання.

Загальний аналіз підтверджує, що другий метод є переважним у контексті гарантування високої якості та тривалості використання зміцнених фальцювальних пластин із заданим профілем, особливо в умовах, де вимоги до точності та деталізації мікрорельєфу є вирішальними. Однак, це може потребувати збільшення початкових інвестицій та витрат на обладнання. Перший спосіб може бути більш доцільним для менш складних або бюджетних проектів, де вимоги до точності мікрорельєфу не настільки



високі, але це може призвести до збільшення оперативних витрат через потенційні пошкодження та необхідність повторної обробки.

## Висновки

1. Виявлено, що основними чинниками виникнення дефектів на мікрорельєфному зміцнювальному шарі плоских фальцювальних пластин є невідповідність технологічних параметрів зміцнення, вибір матеріалів, а також методи обробки, які не враховують специфіку механічного формування пластин у заданий профіль.

2. Встановлено, що під час формування профілю механічна обробка може спричинити порушення цілісності мікрорельєфу, особливо в точках високого наван-

таження та складності геометрії, де мікрорельєф особливо вразливий до деформацій та інших видів пошкоджень.

3. Ідентифіковано критичні параметри та впливи, що найбільше сприяють збереженню цілісності мікрорельєфу під час механічної обробки, включаючи оптимальні швидкість та тиск обробки.

4. Розроблено оптимізовані процедури та технічні рекомендації, спрямовані на мінімізацію дефектів та покращення якості робочої поверхні профільних фальцювальних пластин. Ці рекомендації включають адаптацію технологічних параметрів, вибір відповідних матеріалів, а також оптимізацію послідовності виробничих операцій для забезпечення високої якості мікрорельєфу.

## Список використаної літератури

1. Volodymyr Dzyura. Dynamics of regular microrelief formation on internal cylindrical surfaces / Volodymyr Dzyura // Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. 2021. № 1(101). pp. 115–128. [https://doi.org/10.33108/visnyk\\_tntu2021.01](https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.01).

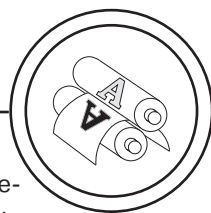
2. Zyhulia S. Effect of the integrated treatment on the manufacturing of printing cylinders / S. Zyhulia, O. Barauskiene // Eastern-European Journal of Enterprise Technologie. 2019. 3/12(99). pp. 22–28. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/171808/171671>.

3. Tadeusz Fraczek. Mechanism of ion nitriding of 316L austenitic steel by active screen method in a hydrogen-nitrogen atmosphere / Tadeusz Fraczek, Marzena Ogórek, Zbigniew Skuza, Rafal Prusak // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. July 2020. 109(5-6). DOI:10.1007/s00170-020-05726-8.

4. Lei Guan. Enhancement of corrosion resistance of 304L stainless steel treated by massive laser shock peening / Lei Guan, Zexin Ye, Jiaxin Zhong, Yu Li, Yongkang Zhang // Optics & Laser Technology. October 2022. Volume 154. 108319. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108319>.

5. Посувайло В. М. Порівняння методів поверхневого зміцнення деталей машин покриттями / В. М. Посувайло, М. В. Шовкопляс, М. М. Романів, В. Ю. Малінін // Вісник Черкаського державного технологічного університету. 2021. № 4. С. 83–97. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.253298>.

6. Паніна В. В. Оброблення робочих поверхонь зубчастих коліс поверхнево-пластичним деформуванням / В. В. Паніна, Г. І. Дашивець, О. Ю. Новік // Науковий вісник ТДАТУ. 2020. Вип. 10. том 2. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/12977/1/20.%20%20%20%9f%20%20%20%bd%20%20%20%96%20%20%20%bd%20%20%20%b0.pdf>.



7. Дудніков А. А. Відновлення деталей поверхневим пластичним деформуванням / А. А. Дудніков, В. В. Дудник, О. А. Бурлака, О. В. Канівець, С. М. Кривонос // Вісник полтавської державної аграрної академії. 2020. № 4. С. 251–258. <https://doi.org/10.31210/visnyk2020.04.32>.

8. Тулупов В. Дослідження технологій поверхневого зміцнення деталей машин / В. Тулупов, С. Онищук // Технічні науки та технології. 2021. № 3(25). С. 55–60. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-3\(25\)-55-60](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-3(25)-55-60).

9. Ling Liu. Research on Surface Strengthening Treatment and Performance of Sewing Machine Shaft Parts / Liu Ling, JianLin Wang, ZiMeng Yao, ShenLi Wu, XiaoMing Liang, BinFeng He // Integrated Ferroelectrics An International Journal. 2023. Volume 237. Issue 1. pp. 287–296. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10584587.2023.2192664>.

10. Danyleiko Oleksandr. Increasing the efficiency of surface strengthening of metal products by combined thermodeformation processing / Oleksandr Danyleiko, Vitaliy Dzhemelinskiy, Dmytro Lesyk, Artemii Bernatskiy // Vibrations in engineering and technology. 2020. No 1(96), pp. 103–110. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/347540875\\_INCREASING\\_THE\\_EFFICIENCY\\_OF\\_SURFACE\\_STRENGTHENING\\_OF\\_METAL\\_PRODUCTS\\_BY\\_COMBINED\\_THERMODEFORMATION\\_PROCESSING](https://www.researchgate.net/publication/347540875_INCREASING_THE_EFFICIENCY_OF_SURFACE_STRENGTHENING_OF_METAL_PRODUCTS_BY_COMBINED_THERMODEFORMATION_PROCESSING).

11. Paliukh O. Defining technological features in the manufacture of semi-hard book covers / O. Paliukh, P. Kyrychok, R. Trishchuk, M. Korobka, E. Dziadyk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. 4/1(106). pp. 80–90. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://journals.uran.ua/ejet/article/view/208798>.

12. Киричок П. О. Дослідження процесів утворення мікрорельєфних напрямних на профільних пластинах для фальцювання інтегральних обкладинок / П. О. Киричок, Д. О. Палюх // Технологія і техніка друкарства. 2023. № 2(80). С. 4–23. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(80\).2023.292277](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(80).2023.292277).

## References

1. Dzyura, V. (2021). Dynamics of regular microrelief formation on internal cylindrical surfaces. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, 1(101), 115–128. [https://doi.org/10.33108/visnyk\\_tntu2021.01](https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.01) [in English].

2. Zyhulia, S., & Barauskiene, O. (2019). Effect of the integrated treatment on the manufacturing of printing cylinders. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologie*, 3/12(99), 22–28. Retrieved from <https://journals.uran.ua/ejet/article/view/171808/171671> [in English].

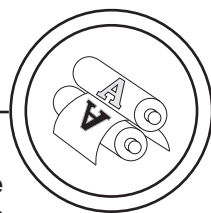
3. Fraczek, T., Ogórek, M., Skuza, Z., & Prusak, R. (July 2020). Mechanism of ion nitriding of 316L austenitic steel by active screen method in a hydrogen-nitrogen atmosphere. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109(5-6). DOI:10.1007/s00170-020-05726-8.

4. Guan, L., Ye, Z., Zhong, J., Li, Y., & Zhang Y. (October 2022). Enhancement of corrosion resistance of 304L stainless steel treated by massive laser shock peening. *Optics & Laser Technology*, Vol. 154, 108319. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108319>.

5. Posuvailo, V. M., Shovkoplias, M. V., Romaniv, M. M., & Malinin, V. Yu. (2021). Porivniannia metodiv poverkhnevoho zmitsnennia detalei mashyn







**The results of the research have the potential to be used in the development of new technologies for the production of folding plates with a specialized profile, which will contribute to increasing the overall quality of folding processes and reducing the costs of maintenance and replacement of equipment.**

**Keywords: microrelief strengthening; folding plates; profile formation; technological parameters; coating defects; experimental modeling.**

Надійшла до редакції 06.11.23