

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Палюх Дмитро Олександрович

УДК 655.35:621.9.048:620.178.16

ДИСЕРТАЦІЯ

Технологічне забезпечення якості деталей механізму фальцювання
інтегральних обкладинок

Спеціальність 186 «Видавництво та поліграфія»
Галузь знань 18 «Виробництво та технології»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Д. О. Палюх

Науковий керівник: Киричок Петро Олексійович, доктор технічних наук,
професор.

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Палюх Д. О. Технологічне забезпечення якості деталей механізму фальцювання інтегральних обкладинок. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 186 «Видавництво та поліграфія». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Навчально-науковий видавничо-поліграфічний інститут, Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-прикладного завдання технологічного забезпечення стабільної якості фальцювання інтегральних обкладинок у сучасних умовах поліграфічного виробництва шляхом підвищення довговічності та точності роботи профільних фальцювальних планок як функціонально відповідальних елементів фальцювальних систем.

Актуальність дослідження зумовлена тим, що якість інтегральних обкладинок безпосередньо залежить від стабільності кінематичної та контактної взаємодії у фальцювальному вузлі, яка, своєю чергою, визначається геометрією профілю фальцювальних планок, послідовністю їх формоутворення та станом робочої поверхні. Зношування планок, деградація мікрогеометрії та порушення умов тертя призводять до геометричних відхилень фальців, перекосів клапанів і зниження якості готової продукції.

У першому розділі здійснено аналіз сучасного стану технологій виготовлення інтегральних обкладинок і чинників, що впливають на їх якість та довговічність упродовж життєвого циклу. Проаналізовано роль процесу фальцювання як критичної стадії післядрукарської обробки, узагальнено основні види дефектів і показано визначальну роль фальцювальних планок у формуванні геометрії клапанів. Обґрунтовано доцільність удосконалення робочих поверхонь планок шляхом формування зміцнювального мікрорельєфу.

У другому розділі розроблено науково-технічні засади технологічного забезпечення якості деталей механізму фальцювання на основі аналізу контактно-механічних, кінематичних і трибологічних параметрів процесу. Обґрунтовано вибір керованих параметрів геометрії профільних фальцювальних планок (кривини, розподілу контактного тиску, умов тертя) та показано доцільність застосування профілів із плавною зміною кривизни і керованого мікрорельєфу для стабілізації процесу формоутворення фальців.

У третьому розділі виконано математичне та чисельне моделювання напружено-деформованого стану профільних фальцювальних планок зі зміцненим мікрорельєфним шаром і розгортку інтегральних обкладинок. Побудовано аналітичні та скінченно-елементні моделі, які дозволяють оцінювати вплив геометрії профілю, параметрів мікрорельєфу та режимів навантаження на концентрацію напружень, деформації клапанів і зносостійкість деталей фальцапарату. Чисельне моделювання показало, що застосування профілів фальцювальних планок із плавною зміною кривизни (евольвентних і комбінованих) дозволяє зменшити пікові напруження у матеріалі обкладинок на 15–30 % порівняно з V-подібними профілями та знизити нерівномірність розподілу контактного тиску вздовж лінії фальца, що забезпечує зменшення геометричних відхилень зведення клапанів у 1,5–2 рази та підвищує повторюваність формоутворення інтегральних обкладинок у межах тиражу.

У четвертому розділі проведено експериментальні дослідження формування зміцнювального мікрорельєфу на профільних фальцювальних планках зі сталей 05кп та 08Х18Н10Б із використанням лазерного та механічного інденторного оброблення. Досліджено геометрію мікрорельєфу, мікроструктуру та мікротвердість приповерхневих шарів і встановлено, що формування зміцнювального мікрорельєфу забезпечує зростання мікротвердості приповерхневого шару у 1,3–1,8 раза порівняно з незміцненим станом та підвищення зносостійкості фальцювальних планок на 25–40 % залежно від способу оброблення і матеріалу основи. При цьому глибина та

крок мікрорельєфних напрямних, сформованих лазерним і механічним інденторним способами, знаходяться у діапазоні десятків мікрометрів, що забезпечує стабілізацію умов тертя та зменшення інтенсивності контактного зношування у фальцювальному вузлі. Виявлено, що керований мікрорельєф сприяє зменшенню дисперсії коефіцієнта тертя та пригніченню режимів нестабільного ковзання типу *stick-slip*, що є однією з основних причин перекосів і нерівної лінії згину.

У п'ятому розділі на основі отриманих теоретичних і експериментальних результатів розроблено конструкцію пристрою для фальцювання і приклеювання клапанів інтегральних обкладинок із вакуумним транспортуванням розгорток і зміцненими профільними фальцювальними планками. Реалізація запропонованих технологічних і конструктивних рішень забезпечує стабільне вакуумне утримання розгортки, обмеження поздовжніх зміщень у межах технологічних допусків та збереження геометричної точності інтегральних обкладинок при зміні формату і жорсткості матеріалу. Застосування зміцнених фальцювальних планок дозволяє збільшити ресурс їх експлуатації та зменшити потребу у переналагодженні і заміні робочих елементів, що має безпосередній техніко-економічний ефект.

У висновках узагальнено основні результати дисертаційного дослідження та підтверджено, що комплексне технологічне забезпечення геометрії профілю, послідовності формоутворення та стану робочої поверхні профільних фальцювальних планок є ефективним шляхом підвищення стабільності процесу фальцювання, якості та довговічності інтегральних обкладинок.

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень в рамках виконання дисертаційної роботи отримано такі найбільш суттєві результати:

Вперше:

– розроблено та науково обґрунтовано концепцію зміцнювальних мікрорельєфних напрямних як мікрогеометричних структур на робочих

поверхнях фальцювальних планок, визначено їх основні морфологічні параметри та залежність від способу формування, що забезпечує підвищення зносостійкості планок на 25–35 %, стабільність процесу фальцювання й покращення якості інтегральних обкладинок.

– встановлено науково обґрунтовані підходи до вибору геометрії профілю фальцювальних планок (U-, V-, евольвентного) з урахуванням товщини та жорсткості матеріалу інтегральних обкладинок, що забезпечує рівномірний розподіл контактних напружень у зоні згину клапанів, зменшення локальних деформацій та запобігання пошкодженню обкладинок.

– визначено вплив послідовності нанесення зміцнювального мікрорельєфу (до або після формування профілю) на збереження його геометрії, точність відтворення та зносостійкість робочого шару фальцювальних планок, при цьому експериментально та розрахунково встановлено, що нанесення мікрорельєфу на вже сформований профіль забезпечує мінімальні спотворення структури, тоді як нанесення його до профілювання супроводжується ризиком часткового згладжування рельєфу.

– встановлено відмінності у формі та симетрії мікрорельєфу, характері зміцнення приповерхневого шару й рівні його зносостійкості під час формування зміцнювальних мікрорельєфних напрямних методами лазерного текстурування та механічного вдавлювання сферичним індентором, що дає змогу цілеспрямовано керувати співвідношенням параметрів «мікротвердість – відтворюваність рельєфу – шорсткість» залежно від умов роботи фальцювально-склеювальних ліній.

Удосконалено:

– технологічні підходи до зміцнення робочих поверхонь фальцювальних планок шляхом інтеграції вибору профілю, послідовності нанесення та способу формування мікрорельєфних напрямних у єдину технологічну схему, що дозволило сформувати узагальнену модель прийняття технологічних рішень, здатну прогнозувати експлуатаційні показники планок

(зносостійкість, стабільність фальцювання, чутливість до зміни матеріалу обкладинок) ще на етапі проєктування технології.

Набули подальшого розвитку:

– наукові обґрунтування екологічно орієнтованих технологій післядрукарської обробки інтегральних обкладинок, у межах яких підвищення довговічності деталей механізму фальцювання розглядається як інструмент ресурсоощадження, що забезпечує зменшення частоти заміни інструменту, скорочення обсягу технологічних відходів і зниження екологічного навантаження поліграфічного виробництва без погіршення якості готової продукції.

Апробацію результатів дисертаційної роботи здійснено шляхом виробничих випробувань процесу фальцювання та приклеювання клапанів розгорток інтегральних обкладинок із використанням запропонованих технологічних і конструктивних рішень на поліграфічному підприємстві ТОВ «ВКП «СТ-ДРУК» (м. Київ).

Результати дисертаційного дослідження впроваджено в навчальний процес Навчально-наукового видавничо-поліграфічного інституту під час проведення лекційних та лабораторних занять з дисциплін «Післядрукарські процеси» та «Технології виготовлення паковань та етикеток», які забезпечує кафедра технології поліграфічного виробництва, для студентів спеціальності 186 «Видавництво та поліграфія». Факт упровадження підтверджено відповідними актами та довідками.

Ключові слова: інтегральні обкладинки; картонна заготовка; полімерні плівки; профільні фальцювальні планки; мікрорельєф; технологічне середовище; геометричний синтез; кінематичні параметри; керування рухом; математичне моделювання; критерії оптимізації; режими лазерної обробки; DLE-гравіювання; профілометрія; достовірність даних.

ABSTRACT

Paliukh D. O. Technological quality assurance of parts of the folding mechanism of integral covers. Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 186 "Publishing and Printing". – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Educational and Scientific Publishing and Printing Institute, Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to solving an actual scientific and applied problem of the technological provision of stable folding quality of integral covers under modern conditions of printing production by increasing the durability and operational accuracy of profiled folding plates as functionally critical elements of folding systems.

The relevance of the study is determined by the fact that the quality of integral covers directly depends on the stability of kinematic and contact interaction in the folding unit, which, in turn, is governed by the geometry of folding plate profiles, the sequence of their shaping, and the condition of the working surface. Wear of folding plates, degradation of microgeometry, and disturbances in friction conditions lead to geometric deviations of folds, misalignment of flaps, and deterioration of finished product quality.

In the first chapter, the current state of technologies for manufacturing integral covers and the factors affecting their quality and durability throughout the life cycle are analyzed. The role of the folding process as a critical stage of post-press processing is examined, the main types of defects are generalized, and the decisive role of folding plates in shaping flap geometry is demonstrated. The expediency of improving the working surfaces of folding plates by forming a strengthening microrelief is substantiated.

In the second chapter, scientific and technical foundations for the technological provision of quality of folding mechanism components are developed based on the analysis of contact-mechanical, kinematic, and tribological parameters of the

process. The selection of controllable geometric parameters of profiled folding plates (curvature, contact pressure distribution, friction conditions) is justified, and the expediency of applying profiles with smoothly varying curvature and controlled microrelief to stabilize the fold formation process is demonstrated.

In the third chapter, mathematical and numerical modeling of the stress–strain state of profiled folding plates with a strengthening microrelief layer and integral cover blanks is performed. Analytical and finite element models are developed to assess the influence of profile geometry, microrelief parameters, and loading regimes on stress concentration, flap deformation, and wear resistance of folding unit components. Numerical simulations have shown that the use of folding plate profiles with smoothly varying curvature (involute and combined profiles) makes it possible to reduce peak stresses in the cover material by 15–30% compared to V-shaped profiles and to decrease the non-uniformity of contact pressure distribution along the fold line, which ensures a 1.5–2-fold reduction in geometric deviations of flap alignment and improves the repeatability of integral cover forming within a production run.

In the fourth chapter, experimental studies of the formation of a strengthening microrelief on profiled folding plates made of 05kp and 08Kh18N10B steels were conducted using laser processing and mechanical spherical indentation. The geometry of the microrelief, microstructure, and microhardness of the near-surface layers were investigated, and it was established that the formation of a strengthening microrelief provides an increase in near-surface microhardness by 1.3–1.8 times compared to the untreated state and an increase in the wear resistance of folding plates by 25–40%, depending on the processing method and base material. The depth and pitch of the microrelief guide structures formed by laser and mechanical indentation were found to be in the range of several tens of micrometers, which ensures stabilization of friction conditions and a reduction in the intensity of contact wear in the folding unit. It was revealed that a controlled microrelief contributes to a reduction in the dispersion of the friction coefficient and suppression of unstable

sliding modes of the stick–slip type, which are among the main causes of flap misalignment and irregular fold lines.

In the fifth chapter, based on the obtained theoretical and experimental results, a device design for folding and gluing flaps of integral covers with vacuum transportation of blanks and strengthened profiled folding plates was developed. Implementation of the proposed technological and structural solutions ensures stable vacuum holding of the blank, limitation of longitudinal displacements within technological tolerances, and preservation of the geometric accuracy of integral covers when changing the format and material stiffness. The use of strengthened folding plates makes it possible to increase their service life and reduce the need for readjustment and replacement of working elements, which provides a direct technical and economic effect.

In the conclusions, the main results of the dissertation research are summarized, and it is confirmed that comprehensive technological provision of profile geometry, shaping sequence, and working surface condition of profiled folding plates is an effective approach to improving the stability of the folding process, quality, and durability of integral covers.

Based on the conducted theoretical and experimental studies within the framework of the dissertation research, the following most significant results were obtained.

For the first time:

- a concept of strengthening microrelief guide structures as microgeometric formations on the working surfaces of folding plates has been developed and scientifically substantiated; their main morphological parameters and dependence on the formation method have been determined, which ensures an increase in the wear resistance of folding plates by 25–35%, stabilization of the folding process, and improvement of the quality of integral covers;

- scientifically substantiated approaches to the selection of the profile geometry of folding plates (U-shaped, V-shaped, and involute) have been established, taking into account the thickness and stiffness of integral cover materials, which ensures a

uniform distribution of contact stresses in the flap bending zone, reduction of local deformations, and prevention of cover damage;

- the influence of the sequence of applying the strengthening microrelief (before or after profile formation) on the preservation of its geometry, reproduction accuracy, and wear resistance of the working layer of folding plates has been determined; it has been experimentally and analytically established that applying the microrelief to an already formed profile ensures minimal structural distortions, whereas application prior to profiling is associated with the risk of partial smoothing of the relief;

- differences in the shape and symmetry of the microrelief, the nature of strengthening of the near-surface layer, and the level of its wear resistance during the formation of strengthening microrelief guide structures by laser texturing and mechanical spherical indentation have been established, which makes it possible to purposefully control the ratio of the parameters “microhardness – relief reproducibility – roughness” depending on the operating conditions of folding–gluing lines.

Improved:

- technological approaches to strengthening the working surfaces of folding plates by integrating the selection of profile geometry, the sequence of application, and the method of forming microrelief guide structures into a single technological scheme, which made it possible to develop a generalized decision-making model capable of predicting the operational performance of folding plates (wear resistance, folding stability, sensitivity to changes in cover material) already at the technology design stage.

Further developed:

- scientific foundations of environmentally oriented post-press processing technologies for integral covers, within which increasing the durability of folding mechanism components is considered as a resource-saving tool that ensures a reduction in tool replacement frequency, a decrease in technological waste volume,

and a reduction in the environmental impact of printing production without deterioration of finished product quality.

The approbation of the dissertation results was carried out through industrial trials of the folding and gluing processes of integral cover blanks using the proposed technological and structural solutions at the printing enterprise TOB «БКП «СТ-ДРУК» (Kyiv).

The results of the dissertation research have been implemented in the educational process of the Educational and Scientific Institute of Publishing and Printing during lectures and laboratory classes in the courses “Post-Press Processes” and “Technologies of Packaging and Label Production,” delivered by the Department of Printing Production Technologies, for students majoring in Specialty 186 “Publishing and Printing.” The implementation is confirmed by relevant official acts and certificates.

Keywords: integral covers; cardboard blanks; polymer films; profiled folding plates; microrelief; technological medium; geometric synthesis; kinematic parameters; motion control; mathematical modeling; optimization criteria; laser processing modes; DLE engraving; profilometry; data reliability.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Публікації у наукових виданнях, включених до наукометричної бази Scopus:

1. Kyrychok, P., Paliukh, D. (2024). Determining of the effect of reinforcing microrelief guides on the efficiency of folding integrated covers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (130)), 97–111.

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309481>

Здобувачем обґрунтовано доцільність застосування зміцнювальних мікрорельєфних напрямних у фальцюванні інтегральних обкладинок, розроблено методiku оцінювання їх впливу, узагальнено експериментальні результати й сформульовано висновки.

2. Kyrychok, P., & Paliukh, D. (2025). Construction of a physical-mechanical model of reinforcing microrelief formation on profiled strips made of AISI 1005 and AISI 347 steels considering surface topology. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(1 (135), 17–29.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.331742

Здобувачем розроблено фізико-механічну модель формування зміцнювального мікрорельєфу на профільних планках, визначено граничні параметри деформування поверхневого шару, виконано математичну інтерпретацію результатів і підготовлено висновки щодо оптимізації режимів зміцнення.

Публікації у фахових наукових виданнях України:

3. Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2023). Аналіз впливу дискретного склеювання інтегральних обкладинок на процеси просторового профільного фальцювання. *Технологія і техніка друкарства*, (1(79), 4–23.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(79\).2023.285537](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(79).2023.285537)

Здобувачем сформульовано постановку задачі дослідження впливу дискретного нанесення клею на процес профільного фальцювання, виконано аналітичний розгляд кінематичних і силових факторів, встановлено їх взаємозв'язок із якістю формування клапанів обкладинки.

4.Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2023). Дослідження процесів утворення мікрорельєфних напрямних на профільних пластинах для фальцювання інтегральних обкладинок. *Технологія і техніка друкарства*, (2(80), 4–23.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(80\).2023.292277](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(80).2023.292277)

Здобувачем розроблено методику формування мікрорельєфних напрямних на профільних пластинах, проведено експериментальні дослідження параметрів рельєфу та визначено їх вплив на зносостійкість і стабільність фальцювання.

5.Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2023). Аналітичне дослідження дефектів мікрорельєфного зміцнення фальцювальних пластин при формуванні профілю. *Технологія і техніка друкарства*, (4(82), 4–21.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(82\).2023.299085](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(82).2023.299085)

Здобувачем виконано класифікацію дефектів, що виникають при формуванні мікрорельєфу, встановлено причини їх утворення та розроблено рекомендації щодо запобігання порушенням геометрії профілю фальцювальних пластин.

6.Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2024). Дослідження впливу геометрії профілю та мікрорельєфного зміцнення на зносостійкість фальцювальних пластин. *Технологія і техніка друкарства*, (1(83), 4–17.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(83\).2024.305494](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(83).2024.305494)

Здобувачем проведено порівняльний аналіз різних профільних конфігурацій планок, встановлено закономірності розподілу напружень і їх вплив на зносостійкість, сформульовано рекомендації щодо оптимальної геометрії.

7.Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2024). Оптимізація чисельного аналізу для прогнозування деформацій обкладинок під час фальцювання. *Технологія і техніка друкарства*, (2(84), 4–20.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(84\).2024.309161](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(84).2024.309161)

Здобувачем розроблено алгоритм чисельного моделювання процесу деформації інтегральних обкладинок під час фальцювання, виконано

верифікацію моделі та визначено критичні параметри, що впливають на якість формування згину.

8.Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2024). Механіко-математичне моделювання процесу профілювання металевих планок для фальцювальних механізмів. *Технологія і техніка друкарства*, (4(86), 4–28.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(86\).2024.334868](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(86).2024.334868)

Здобувачем побудовано механіко-математичну модель профілювання планок, визначено умови формування евольвентних і криволінійних профілів, здійснено аналіз напружено-деформованого стану матеріалу.

9.Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2025). Механіко-математичне моделювання процесу вакуумного транспортування розгортки інтегральної обкладинки. *Технологія і техніка друкарства*, (3(89), 4–21.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(89\).2025.345764](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(89).2025.345764)

Здобувачем розроблено модель вакуумного транспортування розгортки інтегральної обкладинки, визначено вплив параметрів вакуумної системи на стабільність позиціонування заготовки перед фальцюванням.

10.Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2025). Обґрунтування технологічних умов високоякісного фальцювання та приклеювання клапанів інтегральних обкладинок. *Технологія і техніка друкарства*, (4(90), 4–25.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(90\).2025.349593](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(90).2025.349593)

Здобувачем визначено технологічні умови забезпечення високої якості фальцювання та приклеювання клапанів інтегральних обкладинок, узагальнено результати експериментальних і розрахункових досліджень та сформовано комплекс практичних рекомендацій.

Публікації у збірниках матеріалів конференцій:

11.Киричок П. О., Палюх Д. О. (2023). Виявлення особливостей застосування клейових апаратів дискретного нанесення клею для виготовлення обкладинок. Поліграфічні, мультимедійні та web-технології: тези доп. VIII Міжнар. наук.-техн. конф. (16-20 травня 2023, м. Харків. – С. 27-29.

<https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/15943/1/Tezisy-konferenciya%20%20PMW-2025.pdf>

12.Киричок П. О., Палюх Д. О. Виявлення особливостей застосування фальцювальних пластин із заданим профілем для виготовлення інтегральних обкладинок. XII International scientific and practical conference «Scientific Theories and Practices as an Engine of Modern Development» (February 28 – March 1, 2024) Bratislava, Slovakia, International Scientific Unity. 2024. 304 p. – P. 282-285.

[https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/02/Scientific theories and practices as an engine of modern development.pdf](https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/02/Scientific_theories_and_practices_as_an_engine_of_modern_development.pdf)

13.Киричок П. О., Палюх Д. О. Порівняльний аналіз фальцювальних пластин з осьовим вигином на 90° та евольвентною кривою в полівграфічному виробництві. 1st International Scientific and Practical Conference "Scientific Exploration: Bridging Theory and Practice" October 14-16, 2024 Berlin, Germany. – P.150–154.

https://www.eoss-conf.com/wp-content/uploads/2024/10/Berlin_Germany-14.10.24.pdf

14.Киричок П. О., Палюх Д. О. Удосконалення поверхневого шару профільних фальцювальних пластин. IV Міжнародна науково-практична конференція «Innovative research and perspectives of the development of science and technology». 29-31 січня 2024 р., Стокгольм, Швеція. – P. 377–380.

<https://eu-conf.com/events/innovative-research-and-perspectives-of-the-development-of-science-and-technology/>

15.Палюх Д. О. Оптимізація фальцювання інтегральних інтегральних обкладинок криволінійними планками. VI Міжнародна науково-практична конференція студентів, магістрантів та аспірантів «Квалілогія книги». (Львів, 3 квітня 2025 р.). – С. 161–163.

https://lpnu.ua/events/vi-mizhnarodna-naukovo-praktychna-konferentsiia-studentiv-mahistrantiv-ta-aspirantiv?utm_source=chatgpt.com

16. Киричок П. О., Палюх Д. О. Вплив лазерного мікрорельєфного зміцнення на фізико-хімічні властивості фальцювальних планок зі сталі AISI 347. X Міжнародна науково-технічна конференція «Поліграфічні, мультимедійні та web-технології» 14-17 травня 2025 року. м. Харків, Україна. – С. 69–71.

<file:///C:/Users/ASUS/Downloads/Tezisy-konferenciya%20%20PMW-2025.pdf>

17. Киричок П. О., Палюх Д. О. Аналіз фізико-хімічних процесів поверхневого зміцнення профільних фальцювальних планок //XXIV International Scientific and Practical Conference “Effectiveness of phytoremediation as a method for soil restoration from petroleum products in the eastern regions of Ukraine”, Zaragoza, Spain, June 16–18, 2025. – P. 241–245.

<https://eu-conf.com/en/events/latest-theories-and-technologies-for-the-development-of-scientific-research/>

ЗМІСТ

ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПРОБЛЕМ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ МЕХАНІЗМУ ФАЛЬЦЮВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ОБКЛАДИНОК....	36
1.1. Якість і довговічність інтегральних обкладинок упродовж життєвого циклу видання.....	36
1.1.1. Етапи життєвого циклу книжково-журнальної продукції.....	36
1.1.2. Чинники довговічності інтегральних обкладинок.....	41
1.1.3. Типові механізми пошкодження і зношування.....	44
1.1.4. Систематизація основних дефектів.....	46
1.2. Теоретичні засади технології фальцювання та склеювання інтегральних обкладинок.....	55
1.2.1. Огляд сучасних наукових підходів до моделювання процесів фальцювання та контактної взаємодії елементів системи.....	55
1.2.1.1. Механіко-математичні моделі згину листових матеріалів.....	57
1.2.1.2. Моделі контактної взаємодії та тертя.....	61
1.2.1.3. Моделі пружно-пластичної поведінки картону у фальці.....	65
1.2.1.4. Моделі адгезійно-клейових процесів.....	69
1.2.2. Конструктивні та технологічні аспекти роботи фальцювально- склеювальних систем для виготовлення інтегральних обкладинок.....	72
1.2.2.1. Транспортувальна система фальцювально-склеювальної лінії та її вплив на умови формування згинів і клейових з'єднань.....	73
1.2.2.2. Функціональне призначення фальцювальних планок у процесі формоутворення інтегральних обкладинок.....	75
1.2.2.3. Клейова секція фальцювально-склеювальної лінії: дозування адгезиву та формування адгезійних зон на клапанах інтегральних обкладинок.....	80
1.2.2.4. Притискні циліндри: фіксація форми та розподіл тиску в зоні склеювання.....	81

1.2.3. Теоретичні аспекти тертя, зношування та мікрогеометрії робочих поверхонь фальцювальних планок.....	83
1.2.4. Узагальнення результатів аналізу та формування наукової проблеми...	84
1.3. Адгезивні матеріали та способи їх нанесення у процесі фальцювання інтегральних обкладинок.....	87
1.3.1. Фізико-хімічні та реологічні властивості адгезивів і їх роль у процесі фальцювання інтегральних обкладинок.....	88
1.3.2. Технології нанесення адгезивів: суцільні, вибіркові та сегментні методи.....	93
Висновки до розділу 1.....	103
РОЗДІЛ 2. НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ЗАСАДИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ФАЛЬЦЮВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ОБКЛАДИНОК ШЛЯХОМ КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ ФАЛЬЦЮВАЛЬНИХ ПЛАНОК.....	104
2.1. Контактно-механічні передумови дефектоутворення та керовані параметри фальцювальних планок.....	105
2.1.1. Кривина профілю як керований чинник деформацій і дефектів матеріалу.....	107
2.1.2. Розподіл контактного тиску як джерело локальних пошкоджень.....	108
2.1.3. Тертя та нестабільне ковзання як причина перекосів і нерівної лінії згину.....	109
2.1.4. Пружне відновлення та залишкові деформації як чинник розклеювання і хвилястості.....	110
2.1.5. Узагальнення: керовані параметри планок і прогнозований поліграфічний ефект.....	111
2.2. Динамічні зусилля, тертя та умови транспортування розгорток у фальцювально-склеювальних системах.....	113
2.2.1. Конструктивні та кінематичні особливості транспортувальної системи.....	114
2.2.2. Контактна взаємодія картону зі стрічками та фальцювальними планками.....	118

2.2.3. Математична модель динамічних зусиль у транспортному вузлі.....	121
2.2.4. Вплив динамічних зусиль на знос фальцювальних планок.....	123
2.3. Просторове формоутворення фальца та адгезивне склеювання інтегральних обкладинок.....	124
2.3.1. Оптимізація просторового формоутворення фальца та сегментного нанесення адгезиву для підвищення міцності інтегральних обкладинок.....	124
2.4. Функціональні, конструктивні та матеріалознавчі параметри профільних фальцювальних планок і чинники їх зношування.....	127
2.4.1. Функціональна роль профільних фальцювальних планок у формуванні інтегральних обкладинок.....	127
2.4.2. Сучасні методи моделювання та вдосконалення мікрорельєфу робочих поверхонь деталей фальцювальних механізмів.....	134
2.4.3. Аналіз зносостійкості фальцювальних пластин з корозійностійкої сталі: вплив матеріалу та технологічних факторів.....	136
2.5. Вплив мікрорельєфного зміцнення на експлуатаційні характеристики профільних фальцювальних планок з корозійностійкої сталі.....	143
2.5.1. Передумови та технологічні принципи формування зміцнювального мікрорельєфу профільних фальцювальних планок.....	143
2.5.2. Конструкція та матеріали інденторів для формування мікрорельєфу...	145
2.5.3. Класифікація інденторів та кінематика формування мікрорельєфу.....	148
2.5.4. Алмазне вигладжування, оптимізація режимів та оцінювання ефективності мікрорельєфного зміцнення.....	149
2.6. Дефекти мікрорельєфного зміцнення профільних фальцювальних планок та обмеження застосування сучасних технологій.....	151
2.6.1. Проблематика дефектів мікрорельєфного зміцнення фальцювальних планок та їх вплив на якість інтегральних обкладинок.....	151
2.6.2. Оптимізація технологій поверхневого зміцнення фальцювальних планок: аналітичний огляд методів крізь призму дефектів.....	154
2.7. Технологічні підходи до застосування та зміцнення профільних фальцювальних планок при виготовленні інтегральних обкладинок.....	159

2.7.1. Технологічні аспекти фальцювання інтегральних обкладинок із застосуванням мікрорельєфно-зміцнених профільних планок.....	159
2.7.2. Аналіз технологічних підходів до формування та зміцнення профільних фальцювальних планок: економічна ефективність та технічні перспективи..	162
Висновки до розділу 2.....	168
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ ТА ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ТА ФОРМОУТВОРЕННЯ ПРИ ФАЛЬЦЮВАННІ ІНТЕГРАЛЬНИХ ОБКЛАДИНОК.....	170
3.1. Математичне та чисельне моделювання деформацій профільних фальцювальних планок з мікрорельєфним зміцненням та розгортка інтегральних обкладинок.....	170
3.1.1. Теоретичні передумови та вихідні рівняння математичного моделювання.....	170
3.1.2. Чисельне моделювання і оптимізація процесів фальцювання та обробки матеріалів для виготовлення інтегральних обкладинок.....	172
3.1.3. Удосконалення чисельної моделі деформацій розгортка інтегральних обкладинок під час фальцювання.....	173
3.1.4. Моделювання фальцювання інтегральних обкладинок методом скінченних елементів із використанням відеоекстензометрії.....	177
3.2. Дослідження впливу геометрії профілю та мікрорельєфного зміцнення на зносостійкість фальцювальних планок.....	183
3.2.1. Постановка задачі моделювання зносостійкості фальцювальних планок.....	183
3.2.2. Комбіновані методи зміцнення фальцювальних планок та оцінка їх придатності для виготовлення інтегральних обкладинок.....	184
3.2.3. Порівняльний аналіз конструктивних особливостей фальцювальних планок.....	186
3.2.4. Моделювання та оптимізація зносостійкості фальцювальних планок: вплив температурних факторів і мікрорельєфних напрямних на довговічність.....	190

3.3. Механіко-математичне моделювання профільного формоутворення та вибір геометрії фальцювальних планок із різних конструкційних матеріалів.....	193
3.3.1. Аналіз моделей профільного формоутворення та постановка задачі дослідження.....	193
3.3.2. Вибір конструкційних матеріалів та оцінка їх формостійкості.....	195
3.3.3. Геометричні моделі профілів фальцювальних планок та їх відповідність конструкційним матеріалам.....	201
3.3.4. Механіко-математична модель пружно-пластичного згину з урахуванням контактної взаємодії та тертя.....	206
3.3.5. Чисельна реалізація моделі та рекомендації щодо вибору геометрії фальцювальних планок.....	210
Висновки до розділу 3.....	217
Розділ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ ЗМІЦНЮВАЛЬНОГО МІКРОРЕЛЬЄФУ НА ПРОФІЛЬНИХ ФАЛЬЦЮВАЛЬНИХ ПЛАНКАХ.....	218
4.1. Мета та завдання експериментальних досліджень.....	218
4.2. Об'єкти, матеріали, обладнання та методи досліджень.....	218
4.3. Експериментальні результати дослідження лазерного формування зміцнювального мікрорельєфу профільних фальцювальних планок.....	224
4.3.1. Серії зразків та режими лазерного зміцнення.....	224
4.3.2. Геометричні характеристики та дефекти мікрорельєфних напрямних.....	225
4.3.3. Вплив лазерного формування на мікротвердість і мікроструктуру приповерхневого шару.....	235
4.3.4. Трибологічні характеристики та прогнозована зносостійкість зміцненого шару.....	239
4.3.5. Узагальнення результатів лазерного зміцнення профільних фальцювальних планок.....	241
4.4. Локальне інденторне зміцнення профільних фальцювальних планок....	242

4.4.1. Фізико-механічні особливості локального вдавлювання індентора.....	242
4.4.2. Аналітичне моделювання контактної взаємодії індентора з пластинами.....	246
4.4.3. Розрахунок параметрів контакту та 3D-візуалізація мікрорельєфу.....	250
4.4.4. Експериментальні дослідження профілограм та параметрів шорсткості.....	254
4.5.Формування інтегрованої системи технологічного забезпечення якості фальцювання інтегральних обкладинок.....	266
Висновки до розділу 4.....	271
РОЗДІЛ 5 КОНСТРУКТИВНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА РОЗРАХУНКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ФАЛЬЦЮВАННЯ І ПРИКЛЕЮВАННЯ КЛАПАНІВ ІНТЕГРАЛЬНИХ ОБКЛАДИНОК.....	272
5.1. Технічні вимоги до нового фальцювально-склеювального пристрою....	272
5.2. Конструкція та принцип роботи розробленого пристрою.....	273
5.3. Розрахункове обґрунтування параметрів вакуумної системи та транспортувальної підсистеми фальцювально-склеювального модуля.....	278
5.3.1. Геометрична та силова модель вакуумного транспортування розгортки інтегральної обкладинки.....	278
5.3.2. Умова стійкого вакуумного утримання та відсутності поздовжнього ковзання.....	280
5.3.3. Коефіцієнт запасу стійкості вакуумного утримання та інженерні критерії надійності.....	284
5.3.4. Аналіз кутової стійкості розгортки під дією асиметричних збурювальних моментів.....	286
5.3.5. Оцінка точності поздовжнього позиціонування розгортки та узгодження з допусками фальцювання.....	289
5.3.6. Узагальнення розрахункових результатів і практичні рекомендації з проєктування вакуумної системи.....	291

5.4. Екологічне обґрунтування та ресурсощадний ефект удосконалення технології післядрукарської обробки інтегральних обкладинок.....	292
5.5. Правова охорона та перспективи впровадження.....	295
Висновки до розділу 5.....	299
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	301
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	304
ДОДАТКИ.....	325

ВСТУП

Актуальність дослідження. Актуальність дисертаційної роботи зумовлена необхідністю забезпечення стабільної та відтворюваної якості процесу фальцювання інтегральних обкладинок у сучасних умовах поліграфічного виробництва, що характеризується точністю формоутворення клапанів, повторюваністю геометрії фальців та дотриманням установлених технологічних допусків у межах тиражу.

Досягнення таких показників безпосередньо пов'язане з довговічністю та точністю роботи профільних фальцювальних планок як функціонально відповідальних елементів фальцювальних систем, контактної-механічної взаємодії яких визначає умови деформування матеріалу обкладинок у зоні згину. Це, своєю чергою, зумовлює необхідність науково обґрунтованого вибору геометрії профілю фальцювальних планок, технологічно визначеної послідовності їх формоутворення та цілеспрямованого керування станом робочої поверхні, зокрема шляхом формування зміцнювального мікрорельєфу.

Як конструктивний елемент книжково-журнальної продукції, інтегральні обкладинки забезпечують не лише зовнішній вигляд, але й довговічність видання, його стійкість до зовнішніх впливів та зручність користування. Вони формують споживче сприйняття про видання, що може суттєво вплинути на вибір покупця та на його подальше сприйняття твору під час читання.

Застосування інтегральних обкладинок зумовлено їх належністю до групи сучасних ергономічних та ресурсощадних книжкових оправ. Їх застосування дозволяє зменшити витрати на виготовлення книги за умови збереження жорсткості, експлуатаційної зносостійкості та декоративних можливостей на рівні палітурних оправ.

Конструктивні особливості інтегральних обкладинок передбачають наявність клапанів різної геометрії, приклеєних до основної частини. Така побудова забезпечує утворення подвійної класної анізотропної структури без

нашарувань дотичних частин клапанів. Це підвищує міцність, захист від зовнішніх впливів і водночас сприяє естетичному вдосконаленню книги.

Підвищені вимоги до якості сучасної поліграфічної продукції зумовлюють необхідність неухильного дотримання галузевих стандартів на всіх етапах виготовлення обкладинок – від друку до післядрукарської обробки.

Особливої уваги потребує процес фальцювання попередньо висічених розгорток, конструкція яких передбачає наявність клапанів для подальшого загинання та приклеювання до основи обкладинки. Фальцювання, як один із пріоритетних етапів післядрукарської обробки, має визначальний вплив на функціональні характеристики та зовнішній вигляд готового виробу.

Помилки або відхилення у процесі фальцювання можуть призвести до дефектів, зокрема перекосу клапанів під час приклеювання, нерівностей фальців, пошкодження чи розриву матеріалу обкладинки. Це не лише знижує якість та споживчу цінність книжкової продукції, але й призводить до збільшення кількості відбракованих напівфабрикатів.

Зростання тиражів та розширення асортименту поліграфічної продукції формують підвищений попит на технологічні рішення, здатні забезпечити стабільну якість фальцювання для широкого спектра матеріалів та форматів обкладинок, зокрема інтегральних. Актуалізується автоматизація процесів, підвищення точності та повторюваності операцій, зменшення кількості браку та зростання продуктивності обладнання.

Якість процесу фальцювання визначається станом робочої поверхні деталей механізму фальцювання (зокрема фальцювальних планок). Їх довговічність і точність роботи безпосередньо залежать від зносостійкості та стійкості до механічних пошкоджень. Постійні навантаження під час фальцювання спричиняють зношування та дефекти поверхні, що призводить до появи пошкоджень на обкладинках – подряпин, вм'ятин або нерівностей фальців.

У цьому контексті актуалізується завдання зміцнення робочої поверхні профільних фальцювальних планок. Одним з методів підвищення їх

експлуатаційних характеристик є формування мікрорельєфних напрямних за допомогою лазерного чи механічного впливу.

Створення мікрорельєфних напрямних також підвищує зносостійкість поверхні та оптимізує взаємодію матеріалу обкладинки з фальцювальною планкою. Це сприяє більш точному й відтворюваному фальцюванню, забезпечуючи рівномірний розподіл зусиль у контактній зоні та знижуючи ризик пошкоджень і деформацій матеріалу.

Застосування лазерного та механічного впливу для формування мікрорельєфних напрямних розглядається як напрям підвищення довговічності робочих поверхонь профільних фальцювальних планок. Лазерна обробка забезпечує високу точність створення структур на поверхні матеріалу, що дозволяє досягати необхідних показників твердості та мікрогеометрії. Механічна обробка, своєю чергою, може доповнювати цей процес, формуючи оптимальні умови взаємодії поверхні планки з матеріалом обкладинки.

Забезпечення стабільної якості фальцювання інтегральних обкладинок потребує комплексного підходу. Він включає дослідження властивостей використовуваних матеріалів, розробку оптимальних режимів роботи обладнання, а також багаторівневий контроль якості на всіх етапах виробництва. Необхідно враховувати вплив механічних характеристик матеріалу обкладинки, зокрема товщини, жорсткості, міцності та еластичності, а також умови експлуатації готового виробу.

Питання підвищення якості та довговічності деталей поліграфічного обладнання, зокрема елементів фальцювальних систем, привертали увагу багатьох дослідників.

Внесок у розвиток теоретичних і прикладних аспектів поліграфічних технологій зробили представники української наукової школи – Киричок П. О., Гавенко С. Ф., Струтинський В. Б., Регей І. І., Роїк Т. А., Полюдов О. М., Киричок Т. Ю., Золотухіна К. І., Розум О. Ф., Величко О. В., Петріашвілі Г. Г. У своїх працях вони досліджували проблеми оптимізації післядрукарських

процесів, підвищення точності та надійності обладнання, а також удосконалення технологій виготовлення інтегральних обкладинок.

Поряд із цим, сучасні тенденції розвитку поліграфічного машинобудування та матеріалознавства висвітлюються у працях Костецького Б. І., Василенко Т. О., Ковальчука В. П., Бурмістрова А. А., які розглядають питання зносостійкості, поверхневого зміцнення та впровадження інноваційних матеріалів.

Досвід зарубіжних дослідників, таких як Löffler F., Stadler P., Liebau D., Sendor M., Engeler H., спрямований на впровадженні лазерних і механічних методів формування мікрорельєфних структур, спрямованих на підвищення довговічності деталей друкарських і пакувальних машин. Це формує основу для подальших досліджень у напрямі технологічного забезпечення якості та надійності фальцювальних планок у виробництві інтегральних обкладинок.

Сучасні тенденції розвитку поліграфічної галузі висувають вимоги не лише до технологічної ефективності, а й до екологічної безпеки виробництва. Дедалі більша увага до принципів сталого розвитку зумовлює потребу в таких технологічних рішеннях, які поєднують високу якість поліграфічної продукції з мінімальним впливом на навколишнє середовище та раціональним використанням ресурсів.

Це передбачає мінімізацію утворення відходів, оптимізацію енерго- й матеріаломісткості процесів, а також удосконалення післядрукарських операцій.

Водночас специфічні виклики післядрукарської обробки – знос робочих поверхонь профільних фальцювальних планок, нерівномірність процесу фальцювання та ризик пошкодження матеріалів обкладинок – вимагають науково обґрунтованих рішень.

Їх реалізація передбачає створення ефективних методів зміцнення робочих поверхонь, оптимізацію режимів роботи обладнання та застосування матеріалів і покриттів, що забезпечують стабільну якість і довговічність інтегральних обкладинок.

Одним із перспективних напрямів підвищення зносостійкості та точності роботи профільних фальцювальних планок є комплексне технологічне забезпечення контактної взаємодії у фальцювальному вузлі, що включає обґрунтований вибір профілю планок, послідовність їх формоутворення та цілеспрямоване вдосконалення робочої поверхні, зокрема шляхом формування зміцнювального мікрорельєфу.

Такий підхід дозволяє керувати змінювати мікрогеометрію зони контакту та покращувати умови взаємодії з матеріалом обкладинок. Водночас аналіз наукових публікацій показує, що низка принципових питань цього напрямку залишається недостатньо вивченою:

1. Науково обґрунтований вибір профілю фальцювальних планок (U-подібний, V-подібний, евольвентний тощо) для роботи з розгортками інтегральних обкладинок різної товщини та жорсткості.

2. Послідовність нанесення мікрорельєфу – до формування профілю чи після. Цей фактор безпосередньо впливає на точність параметрів мікрорельєфу, стабільність процесу фальцювання та довговічність планок.

3. Вибір технології нанесення мікрорельєфних напрямних – лазерна обробка або механічне вдавлювання сферичного індентора. Від цього залежать геометричні параметри, фізико-механічні властивості та рівень зносостійкості робочих поверхонь.

Таким чином, формується наукове протиріччя, яке узагальнено представлено на рис. 1.

Воно полягає у невідповідності між необхідністю забезпечення високої якості та довговічності процесу фальцювання інтегральних обкладинок і відсутністю науково обґрунтованої технології, що регламентує вибір профілю фальцювальних планок, а також послідовність і спосіб нанесення зміцнювального мікрорельєфу.

Якість фальцювання інтегральних обкладинок визначає точність з'єднання клапанів з основою, від чого залежить геометрична стабільність, довговічність і споживчі властивості готового видання.

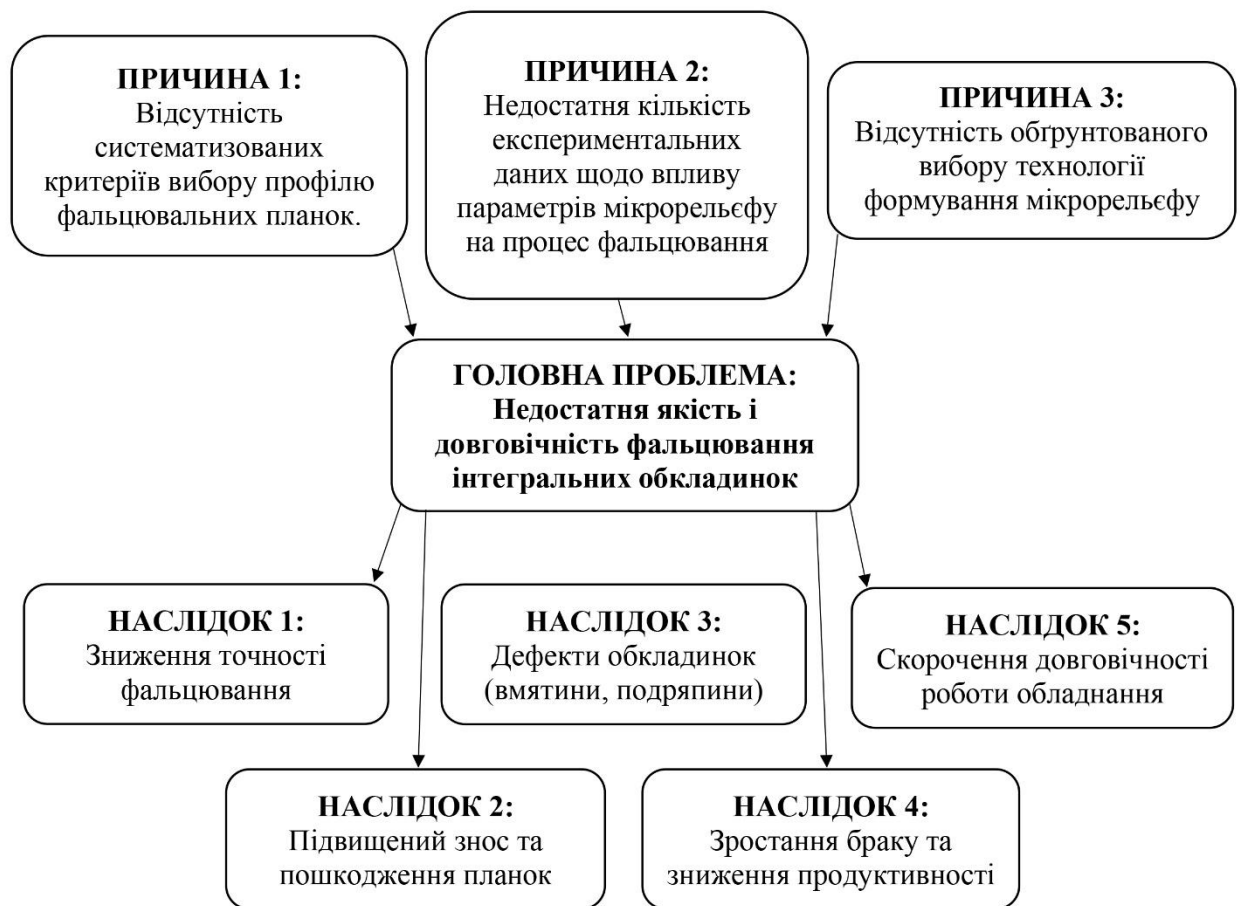


Рис. 1. Схема-протиріччя дослідження якості та довговічності процесу фальцювання інтегральних обкладинок

Водночас відсутність науково обґрунтованих технологічних рішень щодо вибору профілю фальцювальних планок, послідовності та способу формування зміцнювальних мікрорельєфних напрямних зумовлює наявність наукового протиріччя між підвищеними вимогами до якості книжково-журнальної продукції та можливостями їх технологічного забезпечення.

Мета і завдання дослідження

Мета дослідження полягає у розробленні та науковому обґрунтуванні комплексної технології забезпечення якості та довговічності процесу фальцювання інтегральних обкладинок шляхом оптимізації геометрії профільних фальцювальних планок, послідовності їх формоутворення та керованого вдосконалення робочої поверхні, зокрема формування зміцнювального мікрорельєфу. Для досягнення поставленої мети в роботі визначено такі завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану технологій фальцювання інтегральних обкладинок та методів підвищення довговічності робочих поверхонь деталей механізму фальцювання (зокрема профільних фальцювальних планок).

2. Дослідити вплив геометрії профілю фальцювальних планок (U-подібний, V-подібний, евольвентний та ін.) на якість фальцювання обкладинок різної товщини та жорсткості.

3. Встановити закономірності формування зміцнювального мікрорельєфу залежно від послідовності його нанесення (до або після профілювання) та визначити оптимальні технологічні параметри.

4. Порівняти ефективність застосування лазерної обробки та механічного вдавлювання індентора для формування мікрорельєфних напрямних з урахуванням їх геометрії, фізико-механічних властивостей та зносостійкості.

5. Розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору конструкції профільних планок і технології нанесення мікрорельєфу, спрямовані на підвищення точності, довговічності та екологічної ефективності процесів фальцювання.

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єкт дослідження – процес фальцювання інтегральних обкладинок у книжково-журнальному виробництві.

Предмет дослідження – конструктивні параметри та технологічні особливості фальцювальних планок, що впливають на якість і довговічність процесу фальцювання, зокрема вибір їх профілю, послідовність і технологія нанесення зміцнювального мікрорельєфу на робочі поверхні.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети дослідження застосовано комплекс методів:

1. Теоретичні методи – аналіз, систематизація та узагальнення наукових джерел з питань технологій післядрукарської обробки, методів підвищення довговічності поліграфічного обладнання, впливу лазерних та механічних обробок на формування мікрорельєфу; методи геометричного та механіко-

математичного моделювання процесу взаємодії фальцювальної планки з матеріалом обкладинки.

2. Експериментальні методи – лабораторні дослідження процесу фальцювання інтегральних обкладинок із використанням фальцювальних планок різного профілю; визначення впливу товщини, жорсткості та механічних властивостей матеріалів обкладинок на якість фальцювання; формування зміцнювальних мікрорельєфних напрямних методами лазерної обробки та механічного вдавлювання індентора.

3. Метрологічні методи – вимірювання геометричних параметрів мікрорельєфу та якості поверхонь за допомогою профілографа, мікроскопії та оптичних методів контролю; визначення твердості та зносостійкості матеріалів згідно з чинними стандартами.

4. Аналітичні та статистичні методи – оброблення експериментальних даних із використанням методів математичної статистики для оцінки достовірності результатів; побудова залежностей між параметрами мікрорельєфу, технологічними режимами формування та якістю фальцювання.

5. Комп'ютерне моделювання – застосування методу скінченних елементів для дослідження напружено-деформованого стану в зоні контакту фальцювальної планки з матеріалом обкладинки та оптимізації геометрії зміцнювального мікрорельєфу.

Наукова новизна дослідження

Вперше:

– розроблено та науково обґрунтовано концепцію зміцнювальних мікрорельєфних напрямних як мікрогеометричних структур на робочих поверхнях фальцювальних планок, визначено їх основні морфологічні параметри та залежність від способу формування, що забезпечує підвищення зносостійкості планок на 25–35 %, стабільність процесу фальцювання й покращення якості інтегральних обкладинок.

– встановлено науково обґрунтовані підходи до вибору геометрії профілю фальцювальних планок (U-, V-, евольвентного) з урахуванням товщини та жорсткості матеріалу інтегральних обкладинок, що забезпечує рівномірний розподіл контактних напружень у зоні згину клапанів, зменшення локальних деформацій та запобігання пошкодженню обкладинок.

– визначено вплив послідовності нанесення зміцнювального мікрорельєфу (до або після формування профілю) на збереження його геометрії, точність відтворення та зносостійкість робочого шару фальцювальних планок, при цьому експериментально та розрахунково встановлено, що нанесення мікрорельєфу на вже сформований профіль забезпечує мінімальні спотворення структури, тоді як нанесення його до профілювання супроводжується ризиком часткового згладжування рельєфу.

– встановлено відмінності у формі та симетрії мікрорельєфу, характері зміцнення приповерхневого шару й рівні його зносостійкості під час формування зміцнювальних мікрорельєфних напрямних методами лазерного текстурування та механічного вдавлювання сферичним індентором, що дає змогу цілеспрямовано керувати співвідношенням параметрів «мікротвердість – відтворюваність рельєфу – шорсткість» залежно від умов роботи фальцювально-склеювальних ліній.

Удосконалено:

– технологічні підходи до зміцнення робочих поверхонь фальцювальних планок шляхом інтеграції вибору профілю, послідовності нанесення та способу формування мікрорельєфних напрямних у єдину технологічну схему, що дозволило сформувати узагальнену модель прийняття технологічних рішень, здатну прогнозувати експлуатаційні показники планок (зносостійкість, стабільність фальцювання, чутливість до зміни матеріалу обкладинок) ще на етапі проектування технології.

Набули подальшого розвитку:

– наукові обґрунтування екологічно орієнтованих технологій післядрукарської обробки інтегральних обкладинок, у межах яких підвищення

довговічності деталей механізму фальцювання розглядається як інструмент ресурсощадження, що забезпечує зменшення частоти заміни інструменту, скорочення обсягу технологічних відходів і зниження екологічного навантаження поліграфічного виробництва без погіршення якості готової продукції.

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення результатів дослідження полягає у створенні науково обґрунтованих підходів до підвищення довговічності та точності роботи фальцювальних планок шляхом формування зміцнювальних мікрорельєфних напрямних. Запропоновані технологічні рішення дозволяють:

- забезпечити стабільну якість процесу фальцювання інтегральних обкладинок із різних матеріалів та форматів;
- зменшити кількість виробничого браку, пов'язаного з нерівностями фальців, пошкодженнями чи розривами матеріалу обкладинок;
- підвищити зносостійкість і довговічність робочих поверхонь фальцювальних планок, що знижує потребу у їх частій заміні та зменшує витрати виробництва;
- оптимізувати режими роботи обладнання та забезпечити повторюваність технологічних операцій;
- інтегрувати отримані результати у виробничу практику поліграфічних підприємств та машинобудівних ділень, що виготовляють фальцювальні системи, спрямовану на підвищення ефективності післядрукарських процесів та зменшення екологічного навантаження за рахунок ресурсозбереження.

Розроблені підходи можуть бути використані при проектуванні й удосконаленні фальцювальних систем, а також у навчальному процесі закладів вищої освіти під час підготовки фахівців у галузі видавничо-поліграфічної справи.

Апробацію результатів дисертаційної роботи здійснено шляхом виробничих випробувань процесу фальцювання та приклеювання клапанів розгорток інтегральних обкладинок із використанням запропонованих

технологічних і конструктивних рішень на поліграфічному підприємстві ТОВ «ВКП «СТ-ДРУК» (м. Київ).

Результати дисертаційного дослідження впроваджено в навчальний процес Навчально-наукового видавничо-поліграфічного інституту КПІ ім. Ігоря Сікорського під час проведення лекційних та лабораторних занять з дисциплін «Післядрукарські процеси» та «Технології виготовлення паковань та етикеток», які забезпечує кафедра технології поліграфічного виробництва, для студентів спеціальності 186 «Видавництво та поліграфія». Факт упровадження підтверджено відповідними актами та довідками.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися та обговорювалися на звітних засіданнях кафедри технології поліграфічного виробництва НН ВПІ; XII International scientific and practical conference “*Scientific Theories and Practices as an Engine of Modern Development*” (February 28 – March 1, 2024), Bratislava, Slovakia; VIII Міжнар. наук.-техн. конф. «*Поліграфічні, мультимедійні та web-технології*» (16–20 травня 2023 р., м. Харків); 1st International Scientific and Practical Conference “*Scientific Exploration: Bridging Theory and Practice*” (October 14–16, 2024, Berlin, Germany); IV Міжнародній науково-практичній конференції «*Innovative research and perspectives of the development of science and technology*» (29–31 січня 2024 р., Стокгольм, Швеція); VI Міжнародній науково-практичній конференції студентів, магістрантів та аспірантів «*Квалілогія книги*» (м. Львів, 3 квітня 2025 р.); X Міжнародній науково-технічній конференції «*Поліграфічні, мультимедійні та web-технології*» (14–17 травня 2025 року, м. Харків, Україна); XXIV International Scientific and Practical Conference “*Effectiveness of phytoremediation as a method for soil restoration from petroleum products in the eastern regions of Ukraine*” (June 16–18, 2025, Zaragoza, Spain).

Дисертація виконана на основі поетапного комплексного дослідження, результати якого відображені у 10 наукових публікаціях автора, у тому числі у двох статтях, індексованих у наукометричній базі Scopus.

Результати, викладені у розділах 2–5 дисертації, частково ґрунтуються на матеріалах зазначених публікацій та використані з дотриманням принципів академічної доброчесності із обов’язковим посиланням на відповідні джерела.

Дисертаційна робота не є механічною сукупністю опублікованих статей, а містить їх системну інтеграцію, розширення теоретичних положень, поглиблений аналіз експериментальних даних та узагальнення результатів із формуванням цілісної наукової концепції.

Науково-дослідна робота виконувалась в рамках госпдоговірної теми (Договір ДНДЧ/15.00/199/25 від 17.04.2025) «Удосконалення транспортуючої системи офсетної друкарської машини *Heidelberg SM-52-4*» між НН ВПІ КПІ ім. Ігоря Сікорського та ТОВ «ВКП «СТ-ДРУК».

За темою дисертаційної роботи опубліковано 17 наукових праць, зокрема:

2 – у періодичних виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus;

8 – у наукових фахових виданнях України категорії «Б»;

7 – у матеріалах і тезах міжнародних науково-практичних конференцій.

Особистий внесок здобувача

Дисертаційна робота є результатом самостійного наукового дослідження здобувача. Основні наукові положення, теоретичні узагальнення та результати експериментальних досліджень, викладені в роботі, отримані автором особисто.

Здобувачем:

– встановлено закономірності формування та зношування зміцнювальних мікрорельєфних напрямних на профільних фальцювальних планках; визначено вплив їх геометричних і технологічних параметрів на ефективність процесу фальцювання інтегральних обкладинок та стабільність формування клапанів [1, 2, 4–6];

– розроблено фізико-механічні, математичні та чисельні моделі профілювання планок, контактної взаємодії елементів фальцювальної системи

та кінематичної деформації клапанів інтегральних обкладинок; виконано розрахункові дослідження напружено-деформованого стану, проведено чисельне моделювання та верифікацію отриманих результатів [2, 7–9];

– визначено технологічні параметри процесів фальцювання та приклеювання клапанів; проаналізовано характерні дефекти фальцювання та мікрорельєфного зміцнення; сформульовано практичні рекомендації щодо забезпечення стабільної якості та підвищення довговічності інтегральних книжково-журнальних обкладинок [3, 6, 10].

Матеріали, оприлюднені у спільних публікаціях, використані в дисертації з урахуванням особистого внеску здобувача. У таких роботах автору належать постановка завдань дослідження, проведення експериментів, обробка та інтерпретація результатів, розроблення моделей і формулювання основних висновків. Співавтори брали участь у формуванні загального наукового напрямку досліджень, обговоренні результатів та редакційній підготовці матеріалів до друку.

Результати, отримані здобувачем у спільних публікаціях, інтегровані до розділів 1–5 дисертаційної роботи з їх систематизацією, розширенням теоретичним обґрунтуванням та узагальненням.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій, вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 154 найменувань та 7 додатків. Загальний обсяг рукопису становить 336 сторінок, 281 з яких займає основний текст. У дисертації 86 рисунків та 29 таблиць.

РОЗДІЛ 1.
АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПРОБЛЕМ
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ
МЕХАНІЗМУ ФАЛЬЦЮВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ОБКЛАДИНОК

1.1. Якість та довговічність інтегральних обкладинок упродовж життєвого циклу видання

1.1.1. Етапи життєвого циклу книжково-журнальної продукції

Життєвий цикл книжково-журнальної продукції є багатостадійним процесом, у якому на кожному етапі формується рівень якості та надійності видання, причому одним із визначальних чинників є оправа – передусім інтегральна обкладинка.

Узагальнення результатів аналізу літературних джерел і нормативних підходів до оцінювання якості поліграфічної продукції дало змогу сформувати структурну схему етапів життєвого циклу інтегральних обкладинок відповідно до методології Life Cycle Assessment (ISO 14040) [1], яку наведено на рис. 1.1.1.

Вона відображає ключові стадії формування експлуатаційних властивостей обкладинок та окреслює комплекс чинників, що визначають їх якість і довговічність протягом життєвого циклу.

На етапі визначення мети та обсягу встановлюється ціль дослідження (підвищення довговічності та зниження браку), визначається функціональна одиниця (одна інтегральна обкладинка певного формату), межі системи (матеріали, обладнання, умови експлуатації та утилізації), а також вимоги до якості даних.

Інвентаризаційний аналіз передбачає збір даних про витрати матеріалів, енергії, параметри фальцювання, кількість дефектів, а також стандартизацію цих даних для порівняння різних технологій.

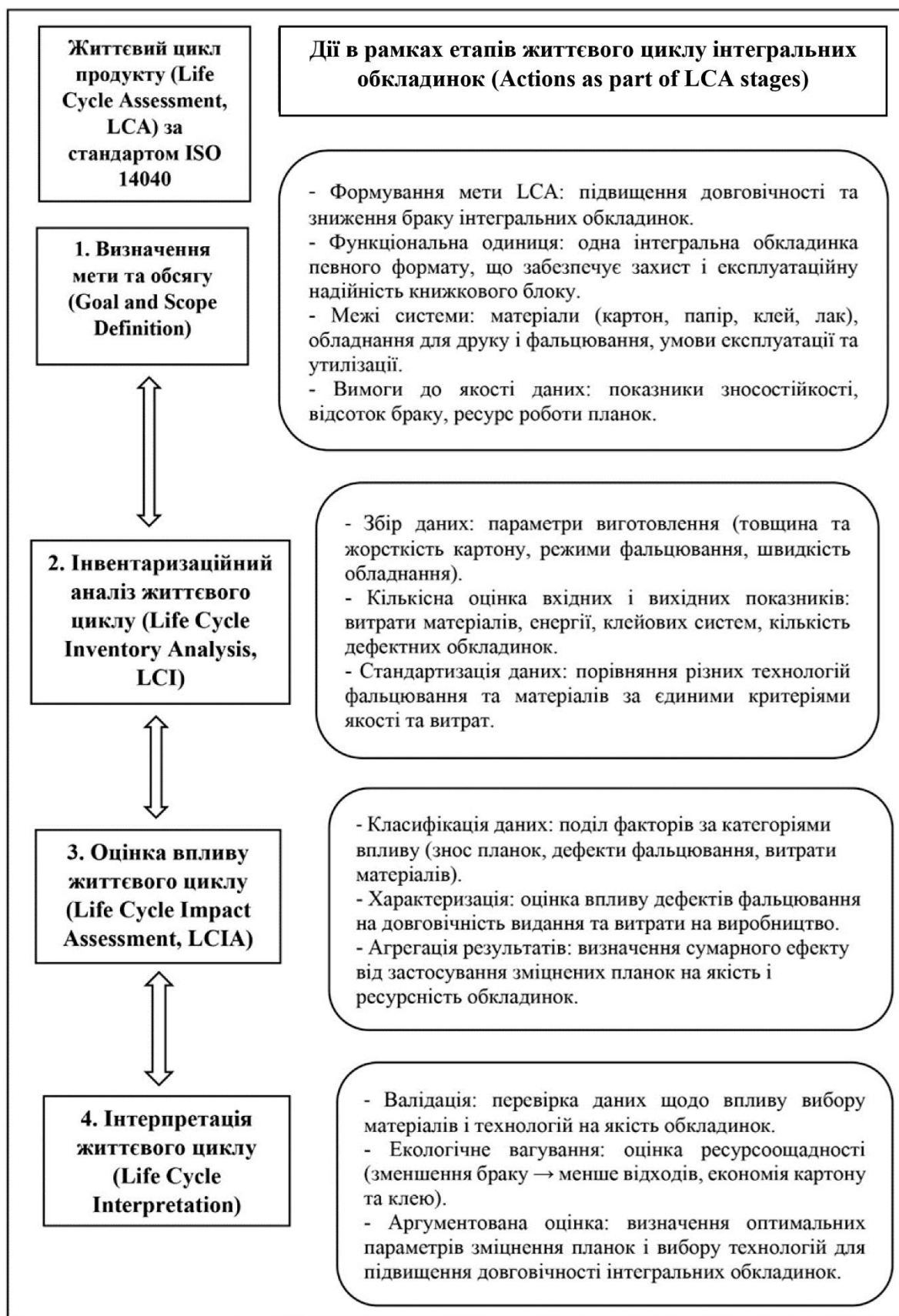


Рис. 1.1.1. Етапи життєвого циклу інтегральних обкладинок за стандартом ISO 14040

Етап оцінки впливу охоплює класифікацію вхідних і вихідних показників за категоріями (знос планок, дефекти фальцювання, витрати ресурсів), кількісну характеристику впливу на якість і ресурсність продукції, а також агрегацію результатів для узагальнення ефекту.

Інтерпретація результатів включає перевірку достовірності отриманих даних, екологічне оцінювання впливів (зменшення відходів, економія картону та клею), а також визначення параметрів зміцнення планок і вибір технологічних рішень, що забезпечують стабільність процесу виготовлення інтегральних обкладинок.

Подальший виклад спрямований на розкриття сутності цих етапів, перш за все – проєктування та вибору матеріалів.

1.Етап проєктування та вибору матеріалів.

Вимоги до інтегральних обкладинок визначаються умовами експлуатації, функціональним призначенням видання та очікуваним терміном його використання. На цьому етапі формується перелік конструктивних і технологічних параметрів, які повинні забезпечувати необхідний рівень міцності, жорсткості та стабільності геометричних розмірів обкладинок. Вибір основних (картон, папір) та допоміжних матеріалів (лаки, ламінати, фольга) впливає на опір фальцюванню, стійкість до багаторазових згинань і здатність обкладинок зберігати форму під дією експлуатаційних навантажень.

Фізико-механічні властивості картону, зокрема товщина, модуль пружності та межа міцності при згині, визначають розподіл напружень у зоні формування фальців. Використання матеріалів із недостатньою жорсткістю або низькою розривною міцністю зумовлює появу тріщин і розривів під час складання. Допоміжні матеріали (полімерні плівки, захисні й декоративні покриття) впливають на коефіцієнт тертя поверхні, адгезію у зоні приклеювання клапанів та опір стиранню [2, 3]. Невідповідність їх властивостей технологічним режимам обладнання підвищує ризик виробничих дефектів і скорочує ресурс готової продукції.

Отже, етап проектування та вибору матеріалів задає початкові умови формування експлуатаційних характеристик інтегральних обкладинок і створює базу для подальшої оптимізації технології фальцювання та підвищення надійності роботи фальцювальних планок.

2. Етап друку і післядрукарської обробки.

Технологічні параметри друкарських та післядрукарських процесів (тиск у зоні контакту, температура закріплення фарб і лаків, швидкість подавання аркушів, точність суміщення зображення й висікання) визначають структурну цілісність інтегральних обкладинок.

Відхилення від оптимальних режимів спричиняє нерівномірний розподіл напружень у матеріалі, що веде до локальних деформацій і втрати геометричної стабільності.

Особливо чутливим є процес фальцювання, коли виникають локальні пікові деформації у зоні згину. За некоректного налаштування обладнання (надмірний тиск, невідповідна швидкість транспортування, неточні режими згину) або при використанні зношених фальцювальних планок формуються характерні дефекти: вм'ятини, подряпини, надриви та розшарування покривних шарів.

Важливим чинником є взаємодія поверхневих покриттів (лаків, ламінатів, фольги) з тиском і температурою в процесі обробки. Відхилення режимів їх закріплення можуть спричиняти відшарування або мікротріщини, що знижує стійкість до подальших експлуатаційних навантажень. Стан та мікрогеометрія робочих поверхонь планок визначають рівномірність формування згину й безпосередньо впливають на рівень браку.

У результаті, етап друку і післядрукарської обробки формує сукупність напружень та потенційних дефектів, які проявляються під час фальцювання і визначають експлуатаційну стійкість обкладинок.

3. Етап фальцювання як стадія життєвого циклу.

Фальцювання визначає точність складання книжково-журнальної продукції. Основними факторами ризику є:

- невідповідність жорсткості та товщини матеріалу параметрам обладнання;
- недосконалість профілю та зношення робочих поверхонь фальцювальних планок;
- відсутність зміцнення поверхонь планок, що зумовлює їх швидке стирання і появу мікродфектів на обкладинках.

Нерівномірний розподіл навантаження у зоні згину призводить до локальних руйнувань волокон картону, що знижує експлуатаційну міцність та довговічність готової продукції.

4.Етап використання та зберігання.

В умовах експлуатації інтегральні обкладинки піддаються впливу механічних (багаторазові цикли відкривання-закривання, стирання, удари), кліматичних (зміни вологості та температури, вплив сонячного випромінювання, світлове старіння) та біологічних факторів (пліснява, мікроорганізми).

Наявність початкових пошкоджень, отриманих під час фальцювання або післядрукарської обробки, істотно знижує стійкість до цих навантажень, що прискорює втрату міцності та скорочує фактичний життєвий цикл книги чи журналу.

5.Етап утилізації та переробки.

Якість застосованих матеріалів і технологія виготовлення інтегральних обкладинок визначають можливість їх повторного використання або утилізації. Значні механічні пошкодження, розшарування покриттів чи застосування матеріалів, які не відповідають екологічним стандартам, ускладнюють процес переробки й знижують рівень ресурсоощадності у видавничо-поліграфічному виробництві.

Аналіз життєвого циклу інтегральних обкладинок засвідчив, що їх довговічність формується під впливом комплексу факторів, серед яких вирішальне значення мають умови післядрукарської обробки, зокрема процес фальцювання клапанів. Саме на цьому етапі виникають локальні деформації

та контактні напруження, які визначають міцність з'єднання клапанів з основою й подальшу стабільність геометрії обкладинки.

Це обґрунтовує доцільність спрямування подальших досліджень на вдосконалення технологічних параметрів робочих елементів фальцювального механізму і формування зміцнювального мікрорельєфу їх робочих поверхонь, що забезпечує підвищення їх зносостійкості, стабільність процесу фальцювання та, відповідно, якість і довговічність інтегральних обкладинок.

1.1.2. Чинники довговічності інтегральних обкладинок

Експлуатаційна стійкість інтегральних обкладинок є функцією комплексу зовнішніх і внутрішніх чинників, які діють на різних етапах життєвого циклу виробу. Ці чинники можна систематизувати за природою енергетичного впливу, джерелом походження, тривалістю дії та характером контакту з матеріалом.

На рис. 1.1.2.1 наведено класифікаційну схему чинників, що впливають на експлуатаційну стійкість інтегральних обкладинок. Систематизація здійснена за чотирма критеріями: природою енергетичного впливу, джерелом походження, тривалістю дії та характером контакту.

Такий підхід дозволяє виділити комплекс умов, які формують експлуатаційні властивості інтегральних обкладинок і визначають тривалість їх життєвого циклу.

Механічні чинники. До них належать навантаження, що виникають під час друку, післядрукарської обробки та особливо у процесі фальцювання.

Тиск фальцювальних планок, абразивний вплив при контакті зі згинальною поверхнею, циклічні деформації під час багаторазового відкривання-закривання книги призводять до локальних концентрацій напружень.

Нерівномірність цих навантажень викликає мікротріщини, розриви волокон картону, деформації покриттів і, як наслідок, зниження експлуатаційної міцності.

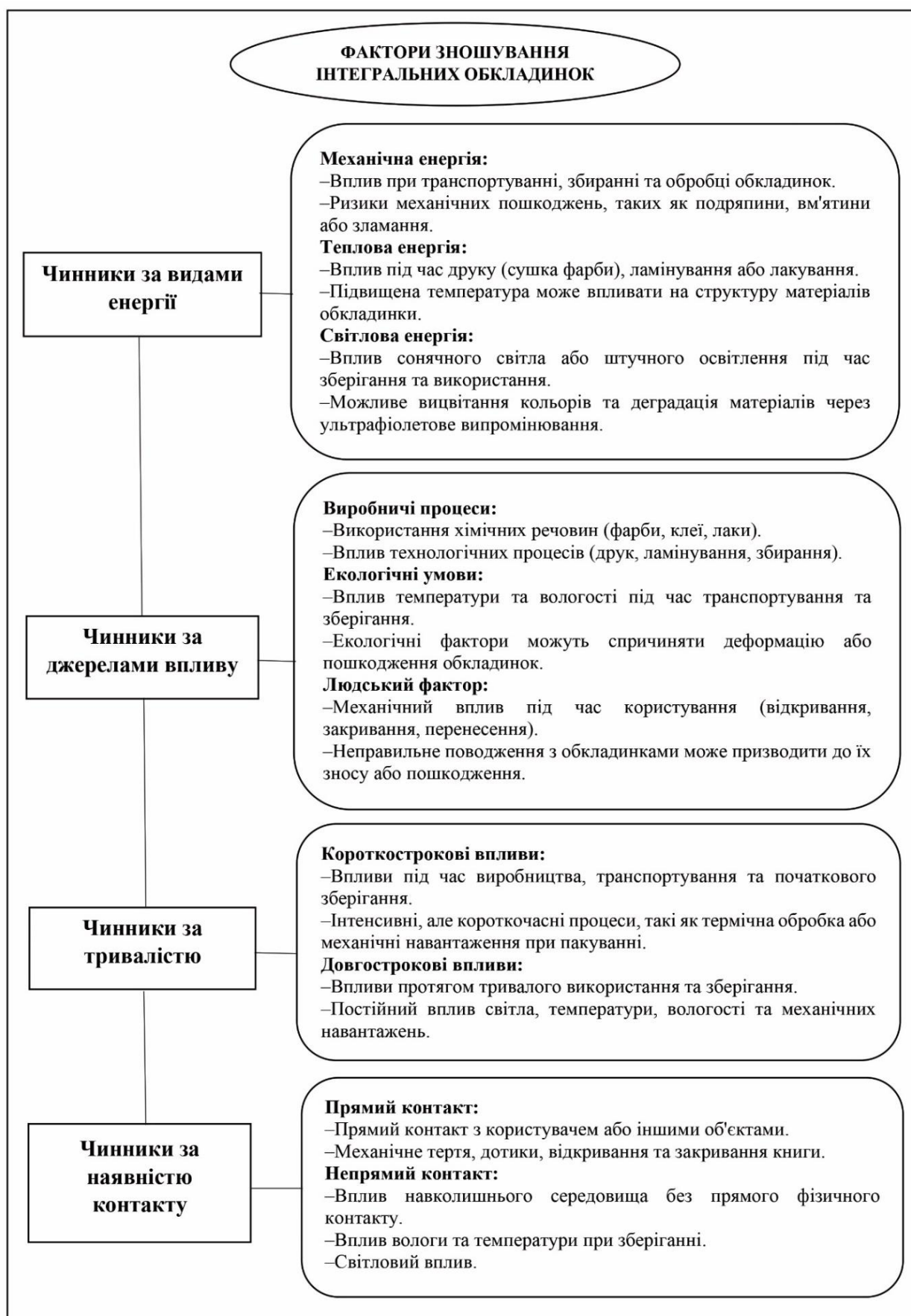


Рис. 1.1.2. Класифікація чинників, що впливають на експлуатаційну стійкість інтегральних обкладинок

Теплові чинники. Вплив температури проявляється як у виробництві (термічне закріплення фарб, гаряче тиснення, ламінування), так і під час експлуатації. Локальний перегрів може змінювати адгезійні властивості клеїв та полімерних плівок, викликати їх крихкість і зниження опору до згинання.

При зберіганні в умовах підвищених температур відбувається прискорене старіння целюлозних волокон і полімерних шарів, що знижує довговічність обкладинок.

Світлові чинники. Довготривалий вплив ультрафіолетового випромінювання призводить до фотостаріння полімерних плівок, пожовтіння лаків, вицвітання друкарських фарб. Це погіршує не лише естетичні властивості, але й фізико-механічні параметри: зниження еластичності покриття збільшує ризик утворення тріщин у зоні фальцювання.

Кліматичні та екологічні чинники. Зміни вологості та температури під час зберігання і транспортування зумовлюють деформації картону, розшарування поліграфічних шарів, а також зростання нерівномірності згину. Біологічні чинники (пліснява, мікроорганізми) також скорочують ресурс використання.

Технологічні чинники. Вони пов'язані з якістю матеріалів і точністю налаштування обладнання. Використання картону зі зниженою жорсткістю або полімерних плівок з нестабільними властивостями зменшує ресурсність обкладинок. Важливим є й стан робочих елементів фальцювального механізму: зношування робочих поверхонь, відсутність зміцнювального мікрорельєфу та недосконалість профілю безпосередньо впливають на виникнення дефектів при формуванні згину. Відхилення налаштувань режимів роботи (тиску, швидкості, температури) збільшує частку браку та прискорює втрату довговічності.

Людський фактор. Порушення технологічної дисципліни, несвоєчасна заміна інструментів, неправильна експлуатація обладнання спричиняють підвищений знос і зниження якості готової продукції.

Узагальнення факторів, що впливають на стан інтегральних обкладинок у процесі виготовлення та експлуатації, показало, що найбільш визначальними

є навантаження, пов'язані з механічним згином і контактною взаємодією в зоні фальцювання. Саме вони спричиняють локальні пошкодження матеріалу, втрату формостійкості та появу дефектів кріплення клапанів. Це підтверджує, що підвищення надійності обкладинок доцільно забезпечувати не лише за рахунок вибору матеріалу, а насамперед через удосконалення конструкційно-технологічних параметрів робочих елементів фальцювального механізму.

1.1.3. Типові механізми пошкоджень і зношування

Зношування та пошкодження інтегральних обкладинок формуються під впливом комплексу факторів, що діють на різних рівнях виробничого й експлуатаційного циклу. Для системного аналізу доцільно розглядати їх у трьох взаємопов'язаних рівнях: зовнішніх впливів, технічних причин і методів діагностики.

1.Верхній рівень – зовнішні фактори.

До зовнішніх належать механічні, теплові, світлові, кліматичні й біологічні впливи. *Механічні навантаження* виникають під час фальцювання, пресування та багаторазового згинання в процесі використання, що спричиняє локальні концентрації напружень і розриви волокон у зоні згину. *Теплові впливи* проявляються при термічному закріпленні фарб, ламінуванні та гарячому тисненні. Локальні перегріви знижують еластичність покриттів і прискорюють утворення мікротріщин. *Світлове старіння* зумовлює деградацію полімерних шарів і вицвітання друкарських фарб, що супроводжується зниженням опору стиранню. *Кліматичні чинники* (зміни вологості та температури) спричиняють викривлення картону й розшарування композиційних шарів.

2. Середній рівень – технічні причини.

Ключову роль у формуванні дефектів відіграє стан робочих поверхонь фальцювальних планок.

– *Зношення профілю* призводить до нерівномірного розподілу тиску та появи вм'ятин і подряпин на обкладинках.

– *Відсутність зміцнювального мікрорельєфу* спричиняє швидке стирання контактних зон і зростання коефіцієнта тертя, що підвищує ймовірність розривів матеріалу.

– *Недосконалість геометрії планок* (відхилення від евольвентної форми) зумовлює нерівномірність згину, утворення надривів і розшарувань покривних шарів.

– *Відхилення налаштувань режимів роботи* (тиск, швидкість транспортування, кути згину) призводить до формування дефектів, які проявляються у вигляді мікротріщин, надривів та хвилястості по лінії згину.

3. Нижчий рівень – діагностика та контроль.

Механізми пошкоджень проявляються у вигляді конкретних дефектів, які можуть бути виявлені за допомогою:

– *візуального контролю* (вм'ятини, подряпини, розриви у зоні фальців);
– *мікроскопічних досліджень* (мікротріщини у полімерних покриттях, руйнування волокон картону);

– *профілометрії та сканування поверхні* (оцінка мікрогеометрії та шорсткості планок, визначення ступеня зношення);

– *механічних випробувань* (тести на багаторазове згинання, визначення опору розриву у зоні фальцювання).

Проведена класифікація типових дефектів інтегральних обкладинок (нерівномірне прилягання клапанів, розшарування, надриви в місцях згину, деформації кромки) засвідчила їх прямий зв'язок із нестабільністю процесу фальцювання та станом робочих поверхонь інструменту. Значна частина дефектів має повторюваний характер, що свідчить про технологічну зумовленість проблеми й можливість її усунення шляхом керованого формування мікрорельєфу на фальцювальних планках. Отже, подальші дослідження мають бути спрямовані на підвищення відтворюваності контакту “планка – матеріал обкладинки”.

1.1.4. Систематизація основних дефектів

Ідентифікація механізмів пошкоджень дозволяє визначити характерні точки виробничого процесу та обґрунтувати необхідність розробки технологій зміцнення робочих поверхонь фальцювальних планок. Узагальнення отриманих результатів подано у табл. 1.1.4.1

Таблиця 1.1.4.1.

Систематизація дефектів інтегральних обкладинок
при фальцюванні за проявами, причинами та наслідками

Група дефектів	Типові прояви	Основні причини виникнення	Наслідки для експлуатаційних властивостей
Механічні пошкодження поверхні	Вм'ятини, подряпини, локальні надриви картону	Зношення або шорсткість поверхні планок; надмірний тиск обладнання	Погіршення зовнішнього вигляду, локальне зниження міцності
Структурні порушення	Мікротріщини в лаках, ламінатах; розшарування покриттів	Низька адгезія шарів; локальний перегрів; невідповідність покриттів механічним навантаженням	Прискорене старіння; зниження захисних властивостей покриттів
Геометричні деформації	Хвилястість по лінії згину; нерівномірність фальців; викривлення клапанів	Недосконалість профілю планок; неправильні режими транспортування; невідповідність товщини матеріалу параметрам обладнання	Втрата геометричної стабільності; складність у склеюванні та подальшій обробці
Комбіновані дефекти	Надриви з одночасним розшаруванням покриття; локальні руйнування з деформаціями	Поєднання механічних і технологічних факторів (зношення планок + крихкість матеріалів)	Скорочення довговічності обкладинок; підвищення відсотка браку у виробництві

Наведена систематизація та узагальнення даних літератури й виробничих спостережень дають підстави стверджувати, що визначальною передумовою підвищення якості та довговічності інтегральних обкладинок є керування саме технологічною стадією фальцювання, оскільки на цьому етапі формується більшість експлуатаційно значущих дефектів.

Аналіз конструктивних схем інтегральних обкладинок (рис. 1.1.4.1–1.1.4.3). свідчить, що операції фальцювання та приклеювання клапанів і

крайок є геометрично взаємопов'язаними та реалізуються в межах єдиного технологічного циклу. За таких умов просторове положення клапанів після згину безпосередньо визначає характер і рівномірність клейового контакту з основою обкладинки [12, 30].

Геометрія зведення клапанів у площині обкладинки формується на етапі фальцювання і характеризується лінійними та кутовими відхиленнями від проектного положення. Навіть незначні порушення траєкторії згину призводять до зміщення крайок клапанів, асиметрії їх положення та нерівномірності притискання в зоні склеювання. Унаслідок цього виникають напуски, проміжки або локальні ділянки неповного клейового контакту [12].

Для симетричних схем інтегральних обкладинок якість приклеювання визначається узгодженістю згину обох клапанів та стабільністю їх просторового положення відносно основи. У випадку несиметричних клапанів різної геометрії чутливість процесу зростає, оскільки відмінності у довжині та жорсткості елементів зумовлюють неоднакові умови деформації та контактної взаємодії з робочими поверхнями фальцювальних планок [12].

Особливо складними є схеми з одночасним приклеюванням клапанів і крайок, де геометрична точність формоутворення визначає не лише якість клейового з'єднання, а й загальну формостійкість інтегральної обкладинки. Порушення повторюваності згину або нестабільність ковзання матеріалу по робочих поверхнях призводять до хвилястості крайок, локальних напружень і подальшого короблення виробу [12].

Оцінювання якості формоутворення та приклеювання в технологічній практиці доцільно пов'язувати з геометричними показниками зведення клапанів, зокрема лінійним відхиленням Δx та кутовим відхиленням $\Delta \varphi$. Крім того, інформативними показниками якості є характерні візуально спостережувані дефекти, такі як перекоси клапанів, хвилястість лінії фальца та локальне неповне приклеювання [12].

Для інтерпретації причин виникнення дефектів у зоні фальцювання та приклеювання в наукових джерелах широко застосовують положення

контактної механіки. У межах цього підходу процес розглядається через аналіз кривини згину, розподілу контактного тиску та сил тертя вздовж лінії взаємодії матеріалу з робочими поверхнями [12, 30].

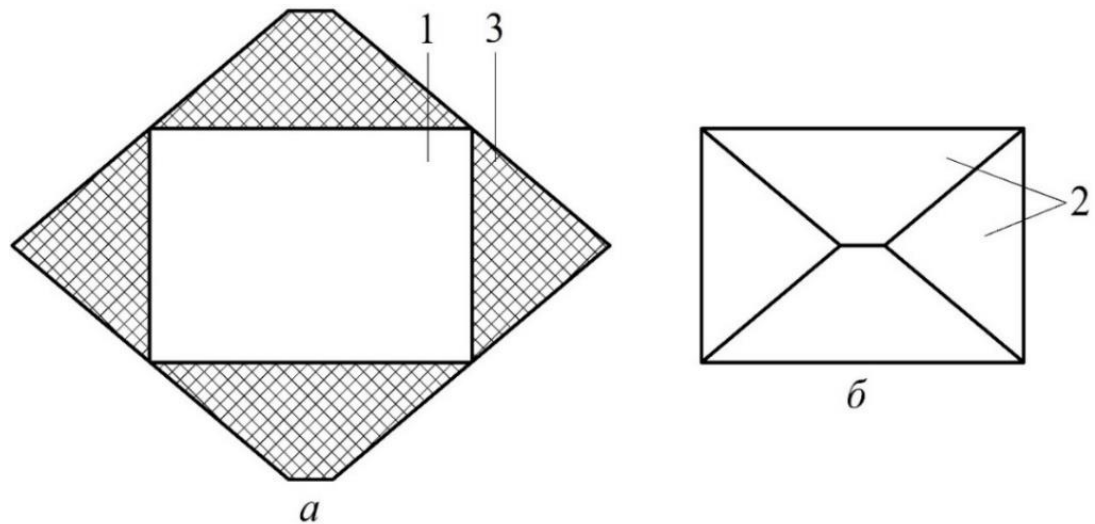


Рис. 1.1.4.1. Просторово-геометрична модель процесу фальцювання інтегральної обкладинки із симетричними клапанами: а – конфігурація розгортки до виконання згину; б – результат суміщення клапанів у площині основи; позначення: 1 – основа; 2 – симетричні клапани; 3 – ділянки клейового з'єднання.

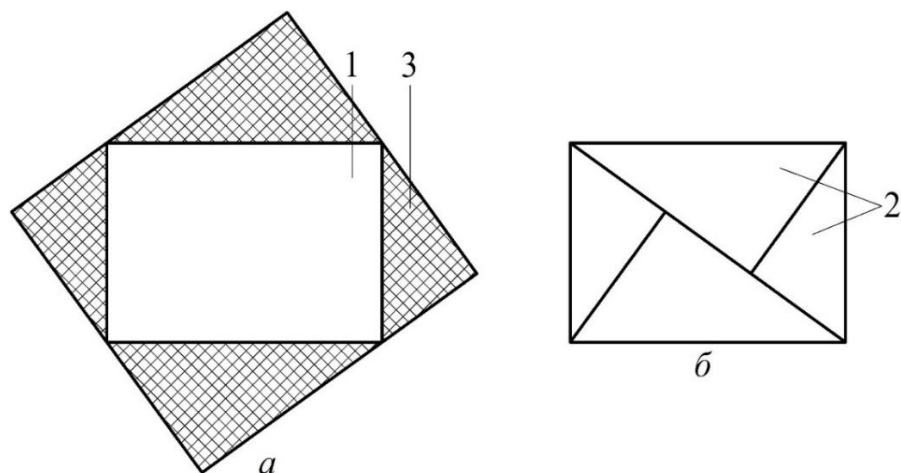


Рис. 1.1.4.2. Просторово-геометрична модель формування інтегральної обкладинки з клапанами несиметричної конфігурації: а – вихідний стан розгорнутої заготовки перед виконанням операції згину; б – результат суміщення клапанів у площині основи після фальцювання; позначення: 1 –

базова частина обкладинки; 2 – клапани, що відрізняються за довжиною та геометричними параметрами; 3 – контактні ділянки клейового з’єднання

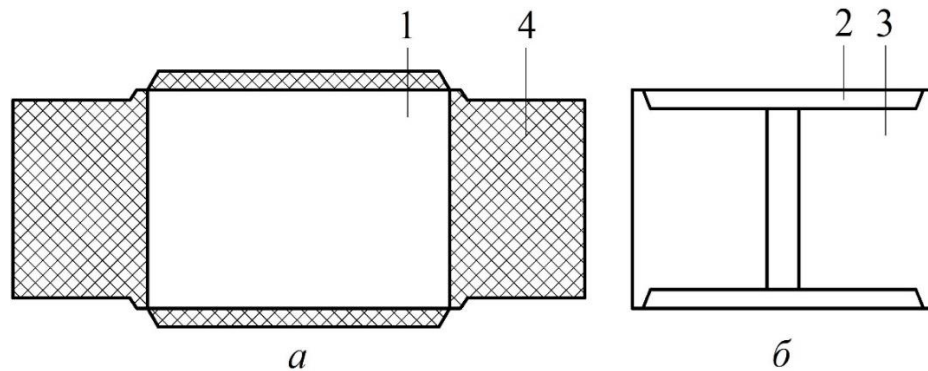


Рис. 1.1.4.3. Модель поєднаного формоутворення та приклеювання клапанів і краєнок інтегральної обкладинки: а – розгорнутий стан заготовки до виконання операції згину; б – суміщення краєнок і клапанів у робочій площині; позначення: 1 – основа; 2 – крайки; 3 – клапани; 4 – контактні клейові ділянки.

На схемах рис. 1.1.4.1 (а, б) представлено випадок симетричних клапанів інтегральної обкладинки. За умови відсутності лінійних (Δx) та кутових ($\Delta \phi$) відхилень зведення по лініях фальца відбувається узгоджено, що забезпечує рівномірний контакт у зоні приклеювання. Поява навіть незначних відхилень на стадії згину порушує геометричне суміщення клапанів з контуром основи, що проявляється у вигляді локальних напусків або зазорів і знижує однорідність притиску по довжині клейового шва [12, 30].

Іншу групу умов формоутворення відображено на рис. 1.1.4.2 (а, б), де розглядаються несиметричні клапани різної довжини та конфігурації. У цьому випадку процес приклеювання ускладнюється відмінностями траєкторій згину та неоднаковою реакцією матеріалу на дію тертя і пружної віддачі. Асиметрія контактних умов зумовлює нерівномірність зведення, відхилення клапанів від осі симетрії обкладинки та формування ділянок із неповним клейовим контактом [12].

Схеми, наведені на рис. 1.1.4.3 (а, б), характеризують поєднане формоутворення клапанів і краєнок. Крайки в цьому випадку виконують

функцію геометричної стабілізації просторової форми інтегральної обкладинки. Точність їх суміщення з основою визначає площинність виробу та відсутність залишкової деформації. Порушення повторюваності параметрів фальцювання або нестабільність ковзання по робочих елементах механізму призводять до хвилястості, локального накопичення напружень та появи вільних проміжків після склеювання [12].

У більшості технологічних схем нанесення клею здійснюється до операції згину, тоді як остаточна конфігурація контактної поверхні формується вже після фальцювання. Відповідно, якість приклеювання визначається не лише характеристиками клею, а насамперед точністю геометричного зведення елементів. Нестабільність деформаційного процесу, локальні перекоси або прояви пружної віддачі можуть призводити до часткового виходу клейового шару за межі ефективної зони контакту, що зумовлює зниження міцності з'єднання та потенційне розклеювання в умовах експлуатації [12].

З позицій забезпечення геометричної точності процес суміщення клапанів і крайок доцільно оцінювати через систему лінійних (Δx) та кутових ($\Delta \varphi$) відхилень відносно базової площини основи обкладинки, що дозволяє формалізувати критерії якості зведення [12].

Перевищення встановлених меж лінійних або кутових відхилень неминує порушує просторову узгодженість елементів обкладинки. У практичному вимірі це проявляється як зміщення клапанів відносно основи, утворення зазорів або ділянок із недостатнім притиском, де клейовий шар не забезпечує повноцінного контакту [12].

Отже, геометрична точність приклеювання безпосередньо залежить від відтворюваності параметрів фальцювання. Чим стабільніше забезпечуються мінімальні значення Δx та $\Delta \varphi$, тим вищою є ймовірність формування цілісної конструкції без напусків, вільних проміжків і локальних дефектів. У цьому контексті керованість процесу згину виступає ключовою умовою отримання інтегральної обкладинки з нормативно заданою просторовою точністю [12].

З огляду на викладене, систематизація дефектів дозволяє встановити зв'язок між проявами порушень у готовій обкладинці та контактними умовами у зоні фальцювання, що створює підґрунтя для подальшої розробки технологій зміцнення фальцювальних планок і оптимізації режимів роботи обладнання [12].

Узагальнення даних літератури та виробничих спостережень свідчить, що більшість характерних дефектів інтегральних обкладинок має спільну технологічну природу та пов'язана з умовами контактної взаємодії у зоні фальцювання (рис. 1.1.4.4). До таких дефектів належать біління матеріалу в зоні згину, мікротріщини у лако-ламінованих шарах, надриви картону, нерівномірність лінії фальца, перекося клапанів і часткове або повне розклеювання [12].

Формування зазначених дефектів зумовлюється піками контактних напружень, нестабільним ковзанням матеріалу по робочих поверхнях фальцювальних планок, а також асиметрією умов тертя під час згину. За таких умов локальні перевантаження призводять до структурного послаблення поверхневих шарів картону, порушення цілісності покриттів і накопичення залишкових деформацій.

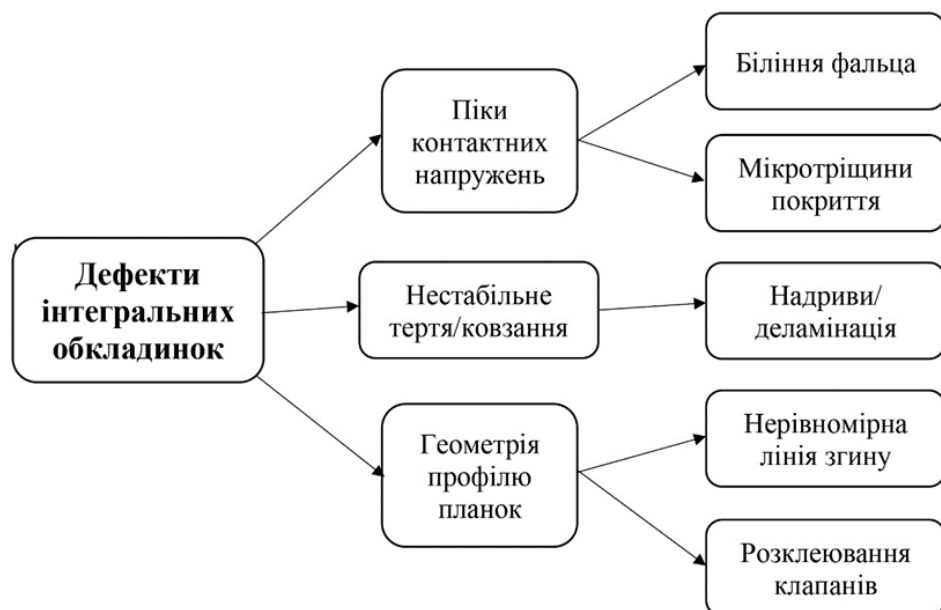


Рис. 1.1.4.4. Модель причинно-наслідкової взаємодії контактних умов фальцювання та формування дефектів інтегральних обкладинок.

Важливою особливістю є те, що дефекти, сформовані на етапі фальцювання, безпосередньо впливають на якість подальшого приклеювання клапанів і крайок. Геометричні відхилення, що виникають під час згину, не компенсуються на стадії клейового скріплення та проявляються у вигляді нерівномірного притискання, зменшення ефективної площі контакту та зниження міцності з'єднання. У підсумку, стабільність процесу фальцювання є визначальною передумовою мінімізації дефектів інтегральних обкладинок і забезпечення прогнозованої якості готової продукції/

Для формалізації встановлених взаємозв'язків розроблено узагальнювальну таблицю (табл. 1.1.4.2), що відображає відповідність між характерними дефектами інтегральних обкладинок, домінуючими контактними факторами процесу згину та параметрами фальцювальних планок, які підлягають технологічному регулюванню/

У реальних умовах дефекти зазвичай мають комбіновану природу, однак у таблиці наведено домінуючі чинники, які є найбільш керованими через профіль та мікрогеометрію робочих поверхонь фальцювальних планок.

Таблиця 1.1.4.2

Класифікаційна схема дефектів інтегральних обкладинок за домінуючими контактними факторами процесу згину

Характер прояву дефекту	Визначальні контактні умови процесу	Фізико-механічний механізм формування	Технологічні засоби запобігання
Оптичне біління у зоні згину	Локальні максимуми контактних напружень у поєднанні з малою кривизною профілю	Різке зростання деформацій зовнішніх шарів при малому радіусі згину → перевищення допустимих розтягувальних деформацій → візуальне освітлення матеріалу	Збільшення радіуса формоутворювальної ділянки; забезпечення плавності переходів профілю
Утворення мікротріщин у покритті	Підвищені контактні напруження разом із	Концентрація поверхневих деформацій і мікрозсуви під час ковзання → руйнування лако-ламінованого шару	Оптимізація мікрорельєфу поверхні; зменшення пікової шорсткості;

	нестабільним тертям		стабілізація коефіцієнта тертя
Надриви або деламінація картону	Значні зсувні напруження при жорсткому профілі згину	Перевантаження міжшарових зв'язків при різкому формоутворенні → ініціація локального руйнування	Зниження градієнтів деформації; застосування профілів із поступовим наростанням кривизни
Нерівномірність лінії фальца	Коливання тертя у поєднанні з геометричною нестабільністю профілю	Переривчасте ковзання («залипання–ривок») → відхилення траєкторії згину	Формування контрольованого мікрорельєфу; забезпечення однорідності контактної поверхні
Часткове або повне розклеювання клапанів	Комбінація нерівномірного згину та пікових напружень	Пружна віддача або викривлення клапана → неповний контакт у зоні клеювого шва	Підвищення стабільності геометрії згину; мінімізація залишкових деформацій
Кутові перекося клапанів	Асиметрія контактних умов і профілю	Різні сили тертя по сторонах клапана → кутове зміщення відносно основи	Забезпечення симетрії профілю; вирівнювання умов ковзання
Хвилястість крайок після склеювання	Накопичення залишкових напружень у поєднанні з нерівномірним тертям	Нерівномірний розподіл деформацій після згину → короблення крайки після фіксації клеєм	Зменшення залишкових напружень; застосування мікрорельєфу, що вирівнює контактні навантаження

Запропоновані параметри регулювання мають практичну придатність до впровадження на стадіях виготовлення та механічної обробки фальцювальних планок. У цьому контексті вони можуть розглядатися не лише як конструктивні характеристики, а як керовані технологічні важелі, спрямовані на прогнозоване зниження ймовірності дефектоутворення та підвищення якості інтегральних обкладинок.

Візуалізацію характерних проявів зазначених дефектів, що формуються на різних етапах фальцювання та подальшого приклеювання клапанів, наведено на рис. 1.1.4.5 [12].

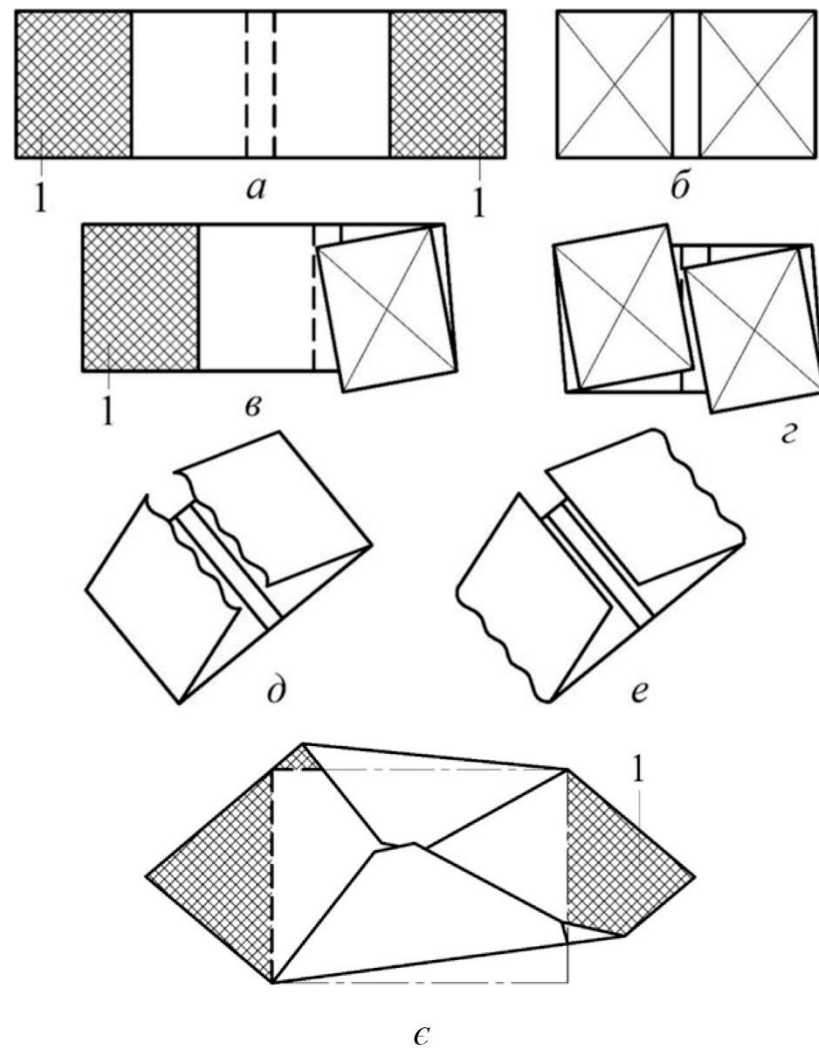


Рис. 1.1.4.5. Порівняння нормативного та дефектного формоутворення інтегральних обкладинок: а – розгортка у стані, що відповідає заданим геометричним параметрам; б – обкладинка після фальцювання та склеювання без лінійних і кутових відхилень; в – кутове зміщення клапана відносно осі симетрії обкладинки; г – порушення симетрії при зведенні клапанів. д – хвилястість клапана після фальцювання; е – нерівномірна лінія фальца; є – перекіс клапанів унаслідок нерівномірного формоутворення згину; 1 – зона клейового контакту.

Це обґрунтовує необхідність подальшого аналізу конструкцій фальцювальних планок і розроблення технології формування зміцнювального мікрорельєфу їх робочих поверхонь, що й визначає зміст наступного підрозділу, присвяченого аналізу технологічних процесів фальцювання.

Унаслідок цього, дефекти фальцювання інтегральних обкладинок слід розглядати не лише як наслідок порушень у роботі обладнання, а як інформативні індикатори стабільності процесу формоутворення.

Їх систематизація та аналіз дозволяють встановити зв'язок між проявами геометричних і структурних порушень у готовій продукції та умовами контактної взаємодії у зоні фальцювання, що визначає вимоги до конструкції та стану робочих поверхонь фальцювальних планок.

1.2. Теоретичні засади технології фальцювання та склеювання інтегральних обкладинок

1.2.1. Огляд сучасних наукових підходів до моделювання процесів фальцювання та контактної взаємодії елементів системи

Процес формування фальца в інтегральних обкладинках здійснюється в умовах високошвидкісного деформування матеріалу, що суттєво впливає на характер його напружено-деформованого стану. За таких режимів у зоні контакту одночасно реалізується комплекс взаємопов'язаних механічних і трибологічних процесів.

Під час проходження заготовки через профільні елементи фальцювальної системи відбувається згин багат шарових поліграфічних матеріалів із супровідним локальним стисканням у контактній області. Одночасно виникають явища ковзання та тертя між картонною основою і робочими поверхнями планок, що зумовлює перерозподіл контактних тисків і зсувних напружень. У товщі матеріалу та в зоні клейових шарів формується складна картина внутрішніх напружень, яка визначає подальшу стабільність геометрії виробу.

Поєднання підвищених швидкостей обробки, високих вимог до просторової точності та варіативності фізико-механічних характеристик картонних основ ускладнює побудову адекватних моделей процесу. Унаслідок цього прогнозування поведінки матеріалу під час фальцювання потребує

врахування як контактних-механічних, так і трибологічних чинників у межах інтегрованого підходу (рис. 1.2.1).

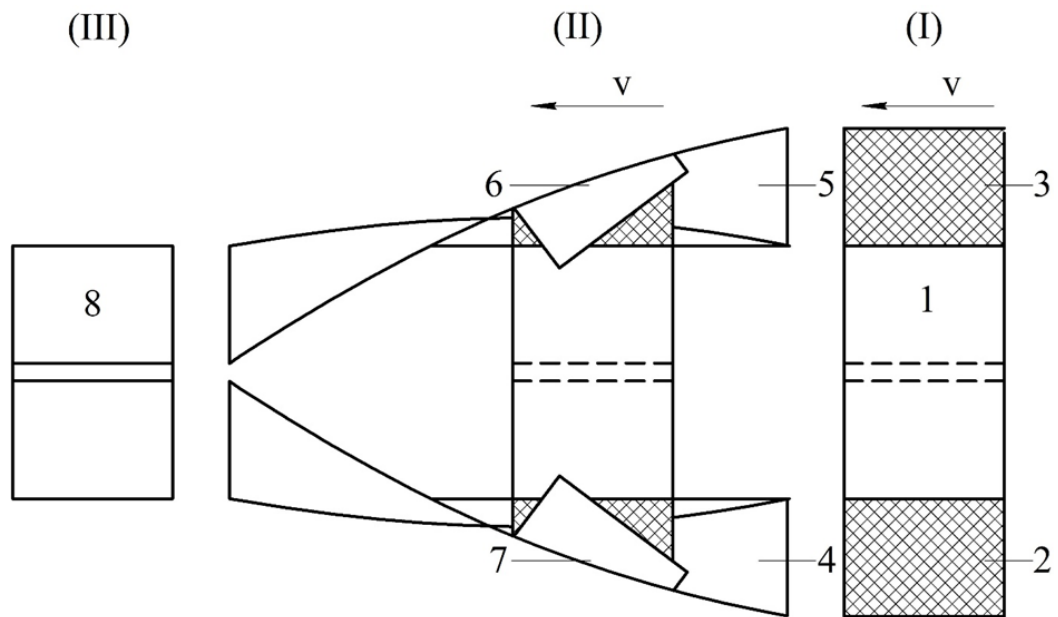


Рис. 1.2.1. Узагальнена схема послідовності операцій фальцювання та приклеювання інтегральної обкладинки: (I) – позиціонування розгортки після нанесення клейового шару на клапани перед початком згину; (II) – формоутворення клапанів у контакті з фальцювальними планками; (III) – завершальна стадія формування та фіксації обкладинки; позначення: 1 – розгорнута заготовка; 2, 3 – клапани з нанесеним клеєм; 4, 5 – профільні елементи фальцювальної системи; 6, 7 – клапани у процесі згину; 8 – сформована обкладинка на фінальному етапі виготовлення.

Протягом останніх років у науковому середовищі сформувався комплекс підходів до дослідження процесів фальцювання інтегральних обкладинок, які відрізняються об'єктом аналізу та методологічними акцентами.

Окремий напрям досліджень ґрунтується на положеннях механіки згину та контактної деформації багатошарових композитних матеріалів. У межах цього підходу аналізується напружено-деформований стан у зоні фальца, встановлюються закономірності розподілу напружень у товщі матеріалу та визначаються граничні параметри, перевищення яких ініціює мікротріщини, деламінацію або хвилястість.

Інша група робіт зосереджена на трибологічній складовій процесу. У цих дослідженнях розглядається взаємодія картонної основи з інструментальними поверхнями фальцювальної системи з урахуванням їх шорсткості, мікрогеометрії та фізико-хімічних характеристик. Показано, що саме умови ковзання, стабільність коефіцієнта тертя та характер контактного навантаження істотно впливають на відтворюваність геометрії згину.

Третій напрям охоплює дослідження ролі клейових шарів у формуванні локальної жорсткості системи «картон – клей – покриття». Особлива увага приділяється способам нанесення клею, зокрема сегментному, та їх впливу на характер деформації клапанів у зоні фальца.

Окремо виділяється підхід, пов'язаний із модифікацією робочих поверхонь інструментів. Йдеться про створення зміцнених мікрорельєфних структур, здатних регулювати умови тертя, вирівнювати розподіл контактних навантажень і підвищувати ресурс фальцювальних планок.

Узагальнення результатів цих досліджень засвідчує, що процес фальцювання має багатопараметричний та нелінійний характер. Його стабільність визначається сукупною дією геометрії інструментальних елементів, фізико-механічних характеристик матеріалу, трибологічних умов контактної пари та режимів навантаження.

З огляду на це, пріоритетним завданням є комплексний аналіз механізмів формування напружено-деформованого стану в поєднанні з дослідженням контактно-трибологічної взаємодії. Такий підхід створює наукове підґрунтя для розроблення технології зміцнення робочих поверхонь фальцювальних планок та підвищення відтворюваності процесу формоутворення інтегральних обкладинок.

1.2.1.1. Механіко-математичні моделі згину листових матеріалів

Аналіз сучасних наукових праць, присвячених механіці поліграфічних і пакувальних матеріалів – зокрема паперу, картону, ламінованих та композитних багатошарових структур – свідчить про багатокомпонентний

характер процесу згину. Згин у таких системах не може розглядатися як суто пружна деформація, оскільки в реальних умовах одночасно реалізуються пружні, пружно-пластичні та локальні контактні-трибологічні механізми.

Деформаційна поведінка матеріалу у зоні фальца формується під впливом градієнтів напружень по товщині, взаємодії шарів із різними модулями пружності та умов ковзання по контактних поверхнях. Унаслідок цього напружено-деформований стан набуває складного просторового характеру, що виходить за межі класичних лінійних моделей.

Водночас, у теоретичних дослідженнях як вихідну основу традиційно використовують класичну модель згину тонких пластин, яка формалізується відповідним диференціальним рівнянням:

$$M = E \cdot I \cdot k, \quad (1.2.1)$$

де M – згинальний момент, E – модуль пружності матеріалу вздовж напрямку дії навантаження, I – момент інерції поперечного перерізу, k – кривина згину.

Для картону як анізотропного, пористого та багатошарового поліграфічного матеріалу застосування лінійної моделі згину є обмеженим. Лінійна залежність між згинальним моментом і кривиною зберігає адекватність лише в умовах малих деформацій, коли структурні зміни матеріалу не виходять за межі пружної області.

У реальних умовах фальцювання інтегральних обкладинок формуються значні локальні деформації, що супроводжуються мікроструктурними перебудовами волокнистої системи. За таких режимів функціональна залежність $M(k)$ набуває вираженого нелінійного характеру, оскільки в процес деформування залучаються додаткові механізми, не враховані класичною теорією тонких пластин.

Нелінійність поведінки зумовлюється комплексом взаємопов'язаних факторів. У зоні фальца відбувається локальне ущільнення внутрішніх шарів за рахунок мікрокомпресії волокнистої структури. Зовнішні шари, які

працюють у режимі розтягу, зазнають пластичної деформації з характерними ознаками зминання. Поряд із цим виникають поперечні зсуви, що суперечать припущенню про збереження площинності перерізів – одному з базових постулатів класичної теорії згину.

Додатковим чинником є анізотропія картону: модулі пружності в машинному та поперечному напрямках можуть відрізнятися в межах 20–60 %, що спричиняє неоднорідність розподілу напружень. Локальна жорсткість системи також змінюється під впливом клейового шару, який підсилює окремі ділянки клапана та модифікує його деформаційну відповідь.

У зв'язку з цим опис реальної роботи картону в зоні згину доцільно здійснювати з використанням нелінійних моделей, здатних врахувати пластичні ефекти, анізотропію матеріалу та контактні взаємодії типу:

$$M = EIk + c_1k^2 + c_2\gamma, \quad (1.2.2)$$

де c_1k^2 – нелінійна складова, що описує зростання опору згину через мікрокомпресію; $c_2\gamma$ – внесок деформацій поперечного зсуву γ при великій кривині та дії локального стискання.

Експериментальні спостереження показали, що за умов підвищених швидкостей фальцювання (1,5–2,0 м/с) деформаційна поведінка картону не обмежується пружно-пластичною складовою. У зазначеному діапазоні швидкостей проявляється додатковий часово-залежний компонент, характерний для в'язко-пружних матеріалів.

Наявність цього ефекту зумовлена внутрішнім тертям у волокнистій структурі та релаксаційними процесами в багатошаровій системі «картон – покриття – клей». Унаслідок цього напружено-деформований стан набуває залежності від швидкості навантаження, а реакція матеріалу характеризується поєднанням миттєвої пружної відповіді та в'язкого опору.

Для формалізації такого режиму доцільним є використання реологічної моделі типу Кельвіна–Фойхта, яка враховує сумарний внесок пружної та в'язкої складових деформації [13]:

$$M(t) = EIk(t) + \eta \frac{dk(t)}{dt}, \quad (1.2.3)$$

де η – в'язкісний коефіцієнт картонної структури.

Аналіз публікацій останніх років, зокрема робіт Papillon, Ubrich, Lee & Kim, а також дослідницьких груп Heidelberg, Osé і HP Indigo, свідчить про поступовий перехід від спрощених до параметризованих моделей згину картонних матеріалів.

Показано, що врахування додаткових структурних характеристик – пористості, орієнтації волокон, наявності ламінованих шарів і клейових прошарків – істотно підвищує достовірність прогнозування дефектоутворення під час фальцювання.

Розширення моделі за рахунок цих параметрів дозволяє адекватніше описати механізми формування мікротріщин, хвилястості, локальних змінань, деформацій, а також асиметрії лінії фальца. Таким чином, дефекти розглядаються не як випадкові прояви, а як наслідок взаємодії геометричних, матеріалознавчих і контактено-механічних чинників.

У сучасному підході картон у процесі фальцювання інтегральних обкладинок інтерпретується як багат шарова композитна система з диференційованими механічними властивостями окремих складових – фронтального шару, внутрішньої волокнистої структури та клейових прошарків.

Така інтерпретація відходить від уявлення про матеріал як однорідну пластину та дозволяє врахувати неоднорідність розподілу напружень по товщині.

Отже, забезпечення стабільної геометрії фальца потребує аналізу не лише інтегрального згинального опору, а й локальних мікромеханічних процесів, що реалізуються в зоні контакту з профільною фальцювальною планкою. Саме ця локальна взаємодія визначає відтворюваність форми та ризик виникнення структурних дефектів.

1.2.1.2. Моделі контактної взаємодії та тертя

Стійкість процесу фальцювання значною мірою визначається характером взаємодії картонної заготовки з робочою поверхнею фальцювальної планки. Саме в межах контактної області формується концентрований напружено-деформований стан, що супроводжується локальними піками тиску, зсувними напруженнями та тепловими ефектами, зумовленими тертям.

Інтенсивність і розподіл цих факторів безпосередньо впливають як на якість формування фальца, так і на довговічність матеріалу, зокрема на ризик виникнення мікропошкоджень, структурної деградації або прискореного зносу покриттів.

У теорії деформівних систем контактна взаємодія описується за допомогою узагальнених співвідношень, що пов'язують нормальні та дотичні складові напружень із геометрією контакту і параметрами матеріалів:

$$\tau = \mu p, \quad (1.2.4)$$

де τ – дотичні напруження тертя; μ – коефіцієнт тертя; p – нормальний контактний тиск.

Реальний процес фальцювання інтегральних обкладинок не може бути адекватно описаний у межах спрощеної кулонівської моделі тертя. Контактна взаємодія в умовах високошвидкісного згину має нелінійний характер і визначається сукупністю мікрогеометричних та структурних факторів.

1) Вплив мікрогеометричних характеристик поверхні фальцювальних планок на контактну взаємодію

Одним із ключових параметрів є стан поверхні фальцювальної планки. Мікрошорсткість і просторове орієнтування мікронерівностей профілю формують реальну конфігурацію контакту між інструментом і картоном. Саме вони визначають фактичну площу дотику, рівень локального контактного тиску p_{local} та характер взаємодії волокон із виступами мікрорельєфу.

Відповідно до контактної моделі Грінвуда–Вільямсона [14], навантаження передається не через номінальну площу контакту, а через сукупність окремих вершин мікронерівностей. У разі наявності дефектів

профілю або підвищеної шорсткості відбувається концентрація контактних зусиль на обмежених ділянках, що може спричиняти зростання локального тиску у кілька разів порівняно з середнім значенням.

Таке підвищення напружень у зоні фальца призводить до структурних пошкоджень матеріалу: появи оптичного біління, ініціації мікротріщин у поверхневих шарах і початкових проявів деламінації. Експериментальні дані з трибології паперових матеріалів свідчать, що навіть помірне збільшення середньої шорсткості робочої поверхні (наприклад, з 0,4 до 0,8 μm) здатне істотно підвищити ризик біління – на десятки відсотків.

Отже, мікрогеометрія профільної планки є не лише технологічною характеристикою інструменту, а пріоритетним фактором формування напружено-деформованого стану картону в зоні контакту.

2) Поперечна жорсткість картону як параметр формування напружено-деформованого стану (E_x)

Деформаційна поведінка картону істотно визначається його анізотропною природою. Механічні характеристики матеріалу є різноспрямованими: опір деформації у площині аркуша (в машинному та поперечному напрямках) суттєво перевищує жорсткість у напрямку товщини.

Така різниця зумовлена орієнтацією волокон та шаруватою структурою матеріалу, внаслідок чого напружено-деформований стан у зоні згину формується неоднорідно. Зокрема, при фальцюванні виникає поєднання розтягувальних напружень у зовнішніх шарах, стискальних деформацій у внутрішній частині та міжшарових зсувів.

У теоретичному описі ця особливість враховується шляхом використання анізотропної моделі матеріалу, в якій механічні параметри задаються окремо для різних напрямків, що може бути представлено відповідними тензорними співвідношеннями:

$$p = f(E_x, h, \delta), \quad (1.2.5)$$

де E_x – модуль пружності у напрямку товщини; h – товщина картону; δ – величина локального вдавлювання профілю.

Чим менший E_x , тим вища ймовірність локальної деформації та утворення «вм'ятин».

3) Кінематичний режим формоутворення інтегральних обкладинок

Параметри контактної взаємодії в процесі фальцювання мають виражену швидкісну залежність. Із підвищенням швидкості переміщення розгортки обкладинки змінюються як коефіцієнт тертя, так і температурний режим у зоні контакту.

За швидкостей понад 1,5–2,0 м/с у контактній парі «картон – фальцювальна планка» фіксуються теплові ефекти, пов'язані з інтенсивним тертям, що призводять до локального підвищення температури до 40–60 °С. Такий температурний режим спричиняє часткове зниження міжволоконної адгезії у поверхневому шарі матеріалу, а також модифікацію стану вторинного контактного шару.

Нестабільність цього шару впливає на характер ковзання і може супроводжуватися зростанням коефіцієнта тертя. У результаті швидкісний режим стає одним із визначальних чинників формування умов зношування інструментальної поверхні та зміни трибологічних характеристик контактної пари.

Отже, швидкість фальцювання виступає не лише кінематичним параметром процесу, а фактором, що безпосередньо модифікує тертя, тепловиділення та інтенсивність зносу фальцювальної планки.

4) Формування вторинного трибологічного шару в зоні контакту

У процесі відносного переміщення картону по робочій поверхні фальцювальної планки формується специфічний контактний прошарок, який у трибології визначають як вторинний шар тертя. Цей шар являє собою тонку плівкову структуру, що утворюється внаслідок перенесення матеріалу з поверхні заготовки на інструмент.

До його складу входять дисперсні частинки целюлозних волокон, залишкові компоненти клею та полімерні складові покриття картону.

Накопичення цих фрагментів у зоні контакту модифікує умови ковзання та змінює характер взаємодії між поверхнями.

У результаті фактичне значення коефіцієнта тертя відрізняється від номінального та набуває залежності від стану вторинного шару, його стабільності та однорідності розподілу:

$$\mu = \mu_0 + \Delta\mu(\omega, R_a, T), \quad (1.2.6)$$

де ω – швидкість ковзання; R_a – параметр шорсткості; T – локальна температура.

Експериментальні дані свідчать, що сформований у зоні контакту вторинний шар тертя може виконувати двоїсту функцію. За певних умов він діє як поліруючий прошарок, сприяючи зниженню коефіцієнта тертя, тоді як в інших випадках проявляється адгезійний механізм, що, навпаки, підвищує опір ковзанню.

Така варіативність зумовлює нестабільність трибологічних характеристик процесу за відсутності керованої мікрогеометрії робочої поверхні інструменту.

Отже, контактна пара «картон – фальцювальна планка» у режимі фальцювання функціонує як складна трибологічна система. Її поведінка визначається сукупністю мікроструктурних властивостей матеріалу, геометрією профілю інструменту, швидкісними умовами та станом вторинного шару тертя.

Порушення оптимальної конфігурації профілю, підвищена шорсткість або наявність локальних концентрацій тиску спричиняють розвиток дефектів – оптичного біління, мікророзривів, деламінацій.

Це обґрунтовує необхідність цілеспрямованого формування контрольованого зміцнювального мікрорельєфу на робочих поверхнях фальцювальних планок як інструменту стабілізації процесу та підвищення його відтворюваності.

1.2.1.3. Моделі пружно-пластичної поведінки картону у фальці

Формування фальца в інтегральних обкладинках відбувається в умовах складного напружено-деформованого стану, що включає одночасну реалізацію пружних, пружно-пластичних і пластичних механізмів. Деформаційна відповідь матеріалу визначається його композитною природою: картон є багатошаровою целюлозно-полімерною структурою з вираженою анізотропією та неоднорідним розподілом міцності в різних напрямках.

У зоні згину ці властивості набувають критичного значення. Нерівномірність жорсткісних характеристик і чутливість до локальних стискальних та розтягувальних напружень формують специфічну реакцію матеріалу на навантаження, що відрізняється від поведінки ізотропних пластин.

Серед характерних проявів деформації картону у фальці особливе місце займає явище пружного відновлення (spring-back). Після зняття зовнішнього зусилля частина накопиченої пружної деформації реалізується у вигляді зворотного відхилення геометрії сформованого згину. Це призводить до зміни кута фальца та порушення заданих просторових параметрів.

Механічною основою цього явища є наявність пружної складової у загальній діаграмі «напруження–деформація». У межах малих і середніх деформацій вона описується лінійним модулем пружності, який визначає частку енергії, що повертається матеріалом після розвантаження:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (1.2.7)$$

де σ – напруження; ε – відносна деформація; E – модуль пружності у відповідному напрямку.

Ефект пружного повернення особливо виражений у випадку картонів з підвищеною еластичністю або матеріалів із ламінованими шарами, де різниця жорсткостей окремих складових спричиняє додаткові внутрішні напруження після розвантаження. У результаті кут сформованого згину може відхилятися від розрахункового значення.

Окрім пружного відновлення, у зоні фальца реалізуються механізми незворотної деформації, пов'язані з досягненням критичних рівнів напружень. Коли локальні значення напруження перевищують межу пропорційності, матеріал втрачає лінійний характер деформаційної відповіді та переходить у режим із накопиченням пластичних змін.

У результаті такого перерозподілу напружень по товщині фальца крайні волокна, орієнтовані назовні, зазнають інтенсивного розтягу, тоді як внутрішня частина перерізу перебуває під дією стискальних зусиль. Саме ця асиметрія напруженого стану зумовлює формування зон локального пошкодження та структурної перебудови матеріалу.

Пориста волокниста структура картону визначає специфіку деформаційних процесів у цій області. У стислих зонах відбувається локальне ущільнення матеріалу, яке супроводжується мікрозминанням волокон та частковим порушенням міжволоконних зв'язків.

Накопичення таких пошкоджень у повторних циклах згину призводить до деградації механічних характеристик, зокрема до зниження ефективного модуля пружності.

З урахуванням цих особливостей деформаційну поведінку картону в зоні фальца доцільно описувати співвідношеннями пружно-пластичного типу, які враховують як нелінійність напружено-деформованої залежності, так і структурні зміни матеріалу:

$$\sigma = \sigma_y + H(\varepsilon - \varepsilon_y), \quad (1.2.8)$$

де σ_y – напруження плинності; ε_y – деформація плинності; H – модуль зміцнення матеріалу.

Для картонних матеріалів характерні невисокі значення параметра зміцнення H , що свідчить про обмежену здатність до деформаційного наклепу. У практичному вимірі це означає, що після досягнення пластичної області матеріал не демонструє суттєвого підвищення опору подальшому

деформуванню, а навпаки – стає чутливішим до накопичення пошкоджень при повторних згинах.

Особливо вразливим є зовнішній поліграфічний шар, який у процесі формування фальца працює в умовах максимальних розтягувальних напружень.

Саме в цій зоні ініціюються типові поверхневі дефекти: оптичне біління, пов'язане з мікророзривами пігментного покриття; зародження мікротріщин і понадривів; порушення адгезії між крейдованим шаром та основою; зниження показників гладкості та блиску. Сукупність цих проявів є наслідком локального перевищення граничних деформацій.

Діаграма деформування (рис. 1.1.4) відображає характерну пружно-пластичну відповідь матеріалу у зоні згину. На стадії навантаження спостерігається зростання напружень до максимального значення σ_{max} за відповідної деформації ϵ_{max} , після чого залежність переходить у нелінійну область.

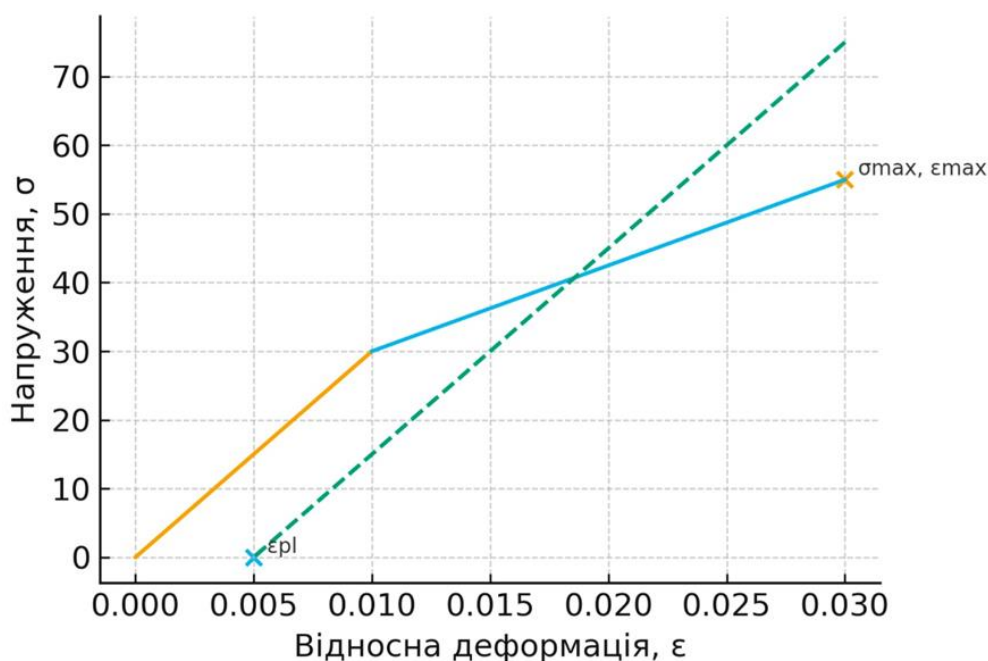


Рис. 1.2.2. Характерна крива деформування картону під час формування фальца відображає послідовний перехід від пружної до пластичної області, граничні значення напруження σ_{max} та деформації ϵ_{max} , а також величину залишкової пластичної складової ϵ_{pl} після зняття навантаження

Після зняття зовнішнього навантаження матеріал не відновлює початкову конфігурацію повністю, що свідчить про формування незворотної складової деформації. Частина накопичених змін зберігається у структурі картону у вигляді пластичного приросту ε_{pl} , який не компенсується під час розвантаження.

Наявність цієї залишкової деформації призводить до стабільного зміщення рівноважного кута згину порівняно з розрахунковим значенням.

Відповідно, саме величина пластичної складової стає визначальним параметром при оцінюванні точності відтворення геометрії фальца та прогнозуванні довготривалої стабільності процесу фальцювання інтегральних обкладинок.

Для поверхневого поліграфічного шару крива має інший характер: вона демонструє підвищену крихкість і обмежену здатність до поглинання енергії деформації.

Після досягнення пікового навантаження спостерігається різке зниження несучої здатності, що супроводжується малою енергією руйнування. Така поведінка обумовлює підвищену схильність декоративних покриттів до мікропошкоджень у зоні згину.

У зв'язку з цим адекватне моделювання дефектоутворення потребує врахування не лише інтегральних механічних характеристик картону, а й локальних властивостей поверхневого шару, зокрема його мікроструктури та адгезійної взаємодії з підкладкою. Це особливо важливо для інтегральних обкладинок із крейдованими або ламінованими покриттями.

Окремим аспектом є просторовий розподіл напружень по товщині матеріалу. У зоні фальца формується виражений градієнт деформацій: зовнішні волокна працюють у режимі розтягу, внутрішні – зазнають стискання, тоді як поблизу нейтральної осі переважають зсувні компоненти. Така неоднорідність напружено-деформованого стану може бути апроксимована спрощеним аналітичним співвідношенням:

$$\varepsilon_z = \frac{kz}{1 + \alpha z^2}, \quad (1.2.9)$$

де z – координата по товщині; k – кривина згину; α – коефіцієнт, що враховує нелінійність композитної структури картону.

Запропоноване співвідношення демонструє, що фактичний розподіл деформацій по товщині картону істотно відрізняється від лінійної схеми, характерної для класичної теорії згину однорідних пластин. Така нелінійність має принципове значення при оцінюванні умов зародження дефектів, оскільки локальні перевищення граничних деформацій не можуть бути коректно передбачені спрощеними моделями.

Деформаційна відповідь картону у зоні фальца визначається поєднанням пружної та пластичної складових, що безпосередньо впливає на точність відтворення заданого кута згину та стабільність його геометрії в часі. Саме співвідношення між пружною відновлюваною частиною та накопиченою пластичною деформацією формує остаточну конфігурацію фальца.

Комплекс взаємопов'язаних явищ – пружне повернення після розвантаження, локальне ущільнення внутрішніх шарів, деградація поверхневого покриття та градієнтний характер напружено-деформованого стану – свідчить про необхідність використання розширених матеріальних моделей. Адекватний опис процесу потребує врахування нелінійності, анізотропії та контактено-трибологічних ефектів в межах інтегрованого підходу до керування параметрами фальцювання.

Таким чином, встановлені закономірності є теоретичною основою для оптимізації геометрії профілю фальцювальної планки, удосконалення умов контактної взаємодії та наукового обґрунтування формування зміцнювального мікрорельєфу на її робочій поверхні.

1.2.1.4. Моделі адгезійно-клейових процесів

Якість з'єднання клапанів інтегральної обкладинки формується під впливом комплексу взаємопов'язаних технологічних параметрів клейового

процесу. Вирішальне значення мають однорідність розподілу клею по поверхні, його реологічні властивості, тривалість відкритої витримки перед притисканням, а також величина прикладеного тиску (рис. 1.2.3, 1.2.4).

Сукупна дія цих чинників визначає повноту змочування поверхонь, ступінь проникнення клею у пористу структуру картону та стабільність формування клейового шва. Відхилення будь-якого з параметрів може призводити до нерівномірності контактної взаємодії та зниження міцності з'єднання.

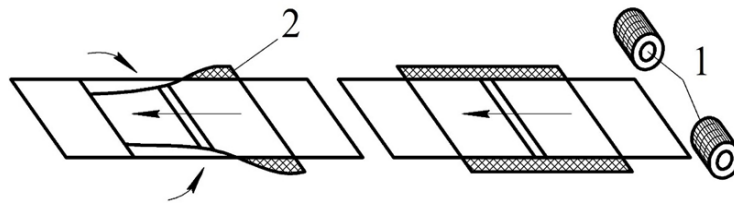


Рис. 1.2.3. Послідовність операцій нанесення клейового шару на крайки обкладинки з наступним формоутворенням фальца: 1 – вузол подавання та дозування клею; 2 – профільний елемент фальцювальної системи.

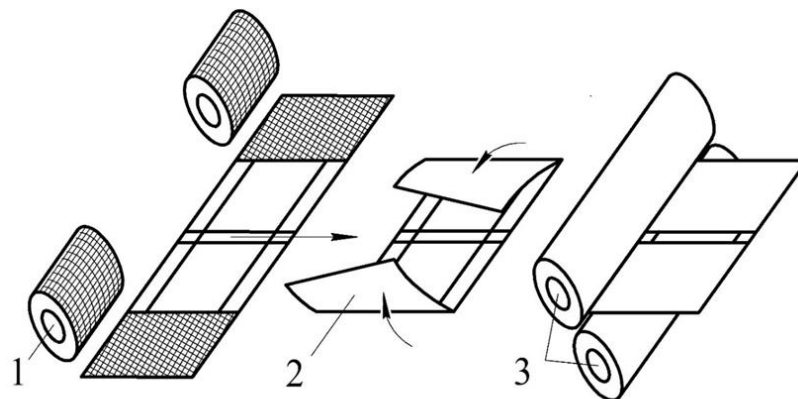


Рис. 1.2.4. Технологічна схема обробки клапанів інтегральної обкладинки з нанесенням клею та подальшим формуванням згину: 1 – клейовий модуль; 2 – профільний вузол фальцювання; 3 – стадія каландрування для стабілізації клейового з'єднання.

Для опису формування клейового шару на поверхні клапанів базовою є модель рівномірного плівкового покриття, у якій товщина шару пов'язана з витратою клею та режимами транспортування:

$$h = \frac{Q}{V \cdot b}, \quad (1.2.10)$$

де h – товщина клейового шару, Q – витрата, v – швидкість транспортування, b – ширина смуги.

Наведене співвідношення базується на умові збереження маси для стаціонарного режиму нанесення клею та використовується як орієнтовна розрахункова залежність під час визначення продуктивності насосного обладнання, налаштування форсунок і вибору швидкості роботи машини. Водночас у виробничих умовах ця оцінка коригується з урахуванням реологічної поведінки клею – його ньютонівських або неньютонівських властивостей, в'язкопружності, температурного режиму, а також мікрорельєфу поверхні картону та можливого захоплення повітря у зоні подавання.

У разі формування сегментних смуг додаткового аналізу потребують просторові інтервали між сегментами, динаміка вмикання та вимикання форсунок, а також допустимі коливання витрати. Ці фактори зумовлюють варіацію локальної товщини шару $h(x)$ уздовж траєкторії руху розгортки та можуть спричиняти неоднорідність клейового з'єднання.

На стадії притискання клапанів клейовий прошарок функціонує як в'язкопружне середовище, а його поведінка описується моделями течії між зближеними поверхнями (squeeze-flow). Застосування таких рівнянь дає змогу оцінити реальну площу контакту, ступінь зменшення товщини шару під тиском і ймовірність витискання клею за межі зони склеювання.

Паралельно відбувається змочування та капілярне проникнення клею у пористу структуру картону. Унаслідок цього ефективна товщина шару зменшується, а інтенсивність всмоктування визначається поверхневою енергією матеріалу, величиною кута змочування та в'язкістю клею. Урахування цих параметрів дозволяє встановити залежність між часом відкритої витримки та зміною реологічних характеристик шару, що, своєю

чергою, визначає допустимий інтервал між нанесенням клею і прикладанням притискного зусилля.

Разом із тим аналіз наукових підходів показує, що більшість існуючих моделей фрагментарно описують окремі складові процесу – згин, контактну взаємодію або клейове з'єднання. Вони практично не враховують вплив мікрогеометрії робочої поверхні фальцювальних планок на стабільність формоутворення та інтенсивність зношування інструменту. Отже, виникає необхідність розширення теоретичних моделей із включенням параметрів мікрорельєфу як чинника керування контактно-трибологічними умовами процесу.

1.2.2. Конструктивні та технологічні аспекти роботи фальцювально-склеювальних систем для виготовлення інтегральних обкладинок

Технологічний комплекс фальцювання та склеювання інтегральних обкладинок реалізується через систему взаємопов'язаних функціональних модулів, до яких належать самонаклад, транспортний механізм, профільні фальцювальні планки, вузол нанесення клею та каландрувально-притискні елементи. Кожен із зазначених компонентів формує власні кінематичні та контактні умови взаємодії між заготовкою обкладинки й інструментальними поверхнями.

Самонаклад і транспортна група визначають точність подавання та позиціонування розгортки, що безпосередньо впливає на суміщення клапанів. Фальцювальні планки формують напружено-деформований стан у зоні згину, тоді як клейовий апарат забезпечує контрольоване дозування й розподіл клейового шару. Каландрувально-притискні циліндри, своєю чергою, стабілізують контакт між поверхнями та формують остаточні параметри клейового з'єднання.

Синхронізація роботи цих вузлів є необхідною умовою відтворюваності просторової геометрії інтегральної обкладинки. Порушення узгодженості кінематичних або контактних режимів призводить до відхилень

позиціонування, нестабільності згину та нерівномірності склеювання. Таким чином, якість кінцевого виробу визначається не ізолюваними характеристиками окремих елементів системи, а їх комплексною взаємодією.

1.2.2.1. Транспортувальна система фальцювально-склеювальної лінії та її вплив на умови формування згинів і клейових з'єднань

Функціональне призначення транспортувального вузла полягає у формуванні керованого кінематичного режиму переміщення розгортки інтегральної обкладинки. Починаючи з моменту її відділення від самонакладу і до проходження зон згину та нанесення клею, заготовка повинна переміщуватися зі сталою швидкістю, без паразитного ковзання та з забезпеченням заданої просторової орієнтації.

Точність взаємного положення розгортки відносно фальцювальних планок і клейових елементів є критичною умовою стабільності подальших технологічних операцій. Відхилення у транспортній ділянці можуть спричиняти зміщення лінії фальца або нерівномірність нанесення клею, що безпосередньо впливає на геометричні параметри виробу.

Конфігурацію та взаємне розташування складових транспортувального модуля наведено на рис. 1.2.5.

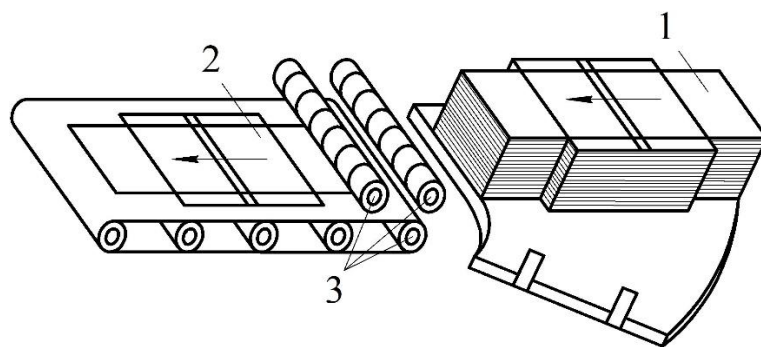


Рис. 1.2.5. Початковий етап подавання розгорток інтегральних обкладинок у транспортувальну систему: 1 – пакет (стопа) розгорток у самонакладі; 2 – одинична заготовка після відокремлення; 3 – робочий елемент механізму транспортування.

Швидкість переміщення напівфабрикату визначає тривалість контакту з інструментом, кінематику згину та часові інтервали для формування клейового шва. Узагальнено цей вплив описують залежністю:

$$t_c = \frac{l_c}{v}, \quad (1.2.11)$$

де t_c – час контакту розгортки з фальцювальною планкою чи притискним елементом; l_c – довжина зони взаємодії; v – лінійна швидкість транспортування.

Збільшення швидкості v скорочує час контакту t_c , що з одного боку підвищує продуктивність, а з іншого – зменшує інтервал, протягом якого можуть розвиватися деформації згину та відбуватися перерозподіл клейового шару. За надто високих швидкостей виникає ризик недостатнього формування згину (ефект «пружного відскоку» клапанів), підвищення ударних навантажень у момент входу в зону контакту та збільшення вібрацій, що негативно впливає на точність позиціонування клейових смуг.

Довжина зони взаємодії l_c визначається конструкцією транспортувальної ділянки та геометрією фальцювальних планок і може регулюватися за рахунок зміни радіусів ведучих/ведених циліндрів, конфігурації направляючих елементів, а також розташування притискних роликів. Збільшення l_c за сталої швидкості дає змогу підвищити час впливу інструмента на матеріал і, відповідно, забезпечити більш плавне формоутворення згину та стабільніше «втискування» клею в структуру картону.

Конструктивно транспортувальні системи можуть базуватися на грейферних механізмах, вакуумних стрічках або комбінованих рішеннях. Вакуумне утримання мінімізує ковзання розгортки та перекося під час проходження через фальцювальні вузли, а також забезпечує стабільну відстань до клейових форсунок. При цьому до розрахунку режимів додаються обмеження за допустимим прискоренням листа (щоб уникнути його деформації чи відриву від транспортуючих елементів) та за допустимими

флуктуаціями швидкості, які можуть призвести до нерівномірності нанесення клею.

Таким чином, при проєктуванні та налаштуванні фальцювально-склеювальних систем для інтегральних обкладинок транспортувальну систему розглядають не лише як засіб переміщення, а як суттєвий елемент, що задає часові й силові умови формування згинів і клейових з'єднань. Оптимізація параметрів v та l_c у комплексі з вибором типу транспортувальних органів є необхідною передумовою для забезпечення стабільної якості обкладинок на високошвидкісних лініях.

Отже, транспортувальна система фальцювально-склеювальної лінії визначає кінематичні умови процесу та забезпечує стабільність переміщення розгортки інтегральних обкладинок між технологічними операціями. Її вплив на якість формоутворення проявляється опосередковано, через сталість швидкості подачі, часу перебування в зоні контакту та відсутність паразитних коливань, які можуть призводити до вторинних зсувів елементів розгортки.

Водночас відхилення критеріїв точності зведення конструктивних елементів за лінійним параметром Δx та кутовим параметром $\Delta \varphi$ формуються переважно в зоні фальцювання, де реалізується безпосередня контактна взаємодія матеріалу з формоутворювальними елементами [15, 16]. Таким чином, транспортувальна система створює необхідні, але не визначальні умови для забезпечення геометричної точності інтегральних обкладинок, тоді як вирішальну роль у керуванні параметрами Δx та $\Delta \varphi$ відіграють геометрія та стан робочих поверхонь фальцювальних планок.

1.2.2.2. Функціональне призначення фальцювальних планок у процесі формоутворення інтегральних обкладинок

Фальцювальні планки виконують функцію спрямованого деформування картону в зоні майбутнього фальца, перетворюючи плоску розгортку інтегральної обкладинки на просторову конструкцію із заданою геометрією згинів (рис. 1.2.6).

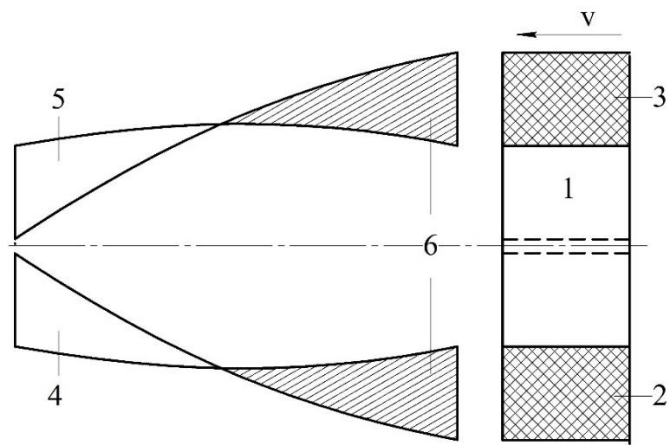


Рис. 1.2.6. Фальцювальні планки й розгортка інтегральної обкладинки: 1 – розгортка інтегральної обкладинки; 2, 3 – клейові ділянки клапанів; 4, 5 – фальцювальні планки; 6 – мікрорельєфні напрямні на робочій поверхні планок; v – напрямок руху обкладинок

В процесі руху розгортки відносно планки картон послідовно піддається пружно-пластичному згину, локальному стиску та розтягання шарів, а також частковому структурному ослабленню зовнішнього покривного шару.

Геометрія профілю планки (U-, V-, евольвентний тощо) визначає траєкторію згину волокнистої структури картону й характер розподілу контактних напружень у зоні взаємодії:

- U-подібний профіль забезпечує більш плавний перехід деформацій, зменшуючи ризик локального надриву зовнішнього шару, але збільшує ширину зони впливу;
- V-подібний профіль формує локалізовану лінію згину з високою концентрацією напружень у вершині, що сприяє чіткому формоутворенню, але вимагає точного підбору радіуса заокруглення для уникнення мікротріщин;
- евольвентний профіль дає змогу реалізувати керований, поступовий ріст кривини уздовж траєкторії згину, наближаючи процес до оптимальної схеми розподілу деформацій, що особливо важливо для багат шарових матеріалів з різною жорсткістю шарів.

До основних факторів, що визначають якість роботи планки, належать:

- радіус профілю;
- кут робочих граней;
- шорсткість поверхні;
- наявність або відсутність структурованого мікрорельєфу на робочих

поверхнях.

Як показано вище, ці параметри впливають на характер згину, концентрацію контактних напружень, умови тертя та ймовірність пошкодження зовнішнього шару картону. Для подальшого теоретичного аналізу й узгодження з експериментальними дослідженнями доцільно подати спрощені розрахункові моделі, які кількісно описують вплив зазначених факторів на напружено-деформований стан матеріалу та умови контакту «планка – картон».

1.Радіус профілю.

Кривина траєкторії згину визначається радіусом профілю R :

$$k = \frac{1}{R}, \quad (1.2.12)$$

де k – кривина лінії згину.

Для картону товщиною t максимальна відносна деформація волокон у зовнішньому шарі при чистому згині може бути оцінена як

$$\varepsilon_{\max} \approx \frac{t}{2R}, \quad (1.2.13)$$

а відповідна напруга (за лінійно-пружною моделлю):

$$\sigma_{\max} \approx E \cdot \varepsilon_{\max} = E \cdot \frac{t}{2R}, \quad (1.2.14)$$

де E – модуль Юнга картону.

Менші значення R (гостріший згин) приводять до зростання $\varepsilon_{\max}$ і $\sigma_{\max}$, збільшуючи ризик мікротріщин та надривів зовнішнього шару; збільшення

(R), навпаки, пом'якшує деформацію, але може спричинити неповне формування згину та більший пружний відскок.

2. Кут робочих граней.

Для V-подібного профілю з кутом при вершині (α) геометричні параметри зони згину пов'язані, наприклад, співвідношенням

$$h = \frac{b}{2} \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad (1.2.15)$$

де h – ефективна глибина входження картону в профіль; b – ширина контакту по поверхні картону.

Зі зменшенням α при сталій b глибина h зростає, що веде до більшої кривини й концентрації напружень у зоні вершини профілю.

Кут α також впливає на розклад сил, які виникають у зоні контакту. Якщо результуюча контактна сила F прикладена вздовж бісектриси кута, нормальна та дотична складові на кожній грані дорівнюють:

$$N = \frac{F}{2} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad T = \frac{F}{2} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right), \quad (1.2.16)$$

де N – нормальна складова (формує контактний тиск); T – дотична складова (визначає тертя та можливе ковзання картону по планці).

Зменшення α збільшує N і змінює співвідношення T/N , впливаючи одночасно на концентрацію напружень та режим тертя.

3. Шорсткість поверхні та тертя.

Шорсткість поверхні планки визначає умови тертя між нею та картоном. Для спрощеного опису впливу середньої арифметичної шорсткості R_a на коефіцієнт тертя μ можна використати емпіричну лінійну модель:

$$\mu \approx \mu_0 + kR_a, \quad (1.2.17)$$

де μ – базове значення коефіцієнта тертя для відносно гладкої поверхні; k – емпіричний коефіцієнт чутливості до шорсткості.

Тоді сила тертя між планкою та картоном:

$$F_{\text{тр}} = \mu N = (\mu_0 + kR_a)N, \quad (1.2.18)$$

де N – сумарна нормальна сила притискання.

Занадто малий R_a знижує $F_{\text{тр}}$ і може призводити до неконтрольованого ковзання розгортки, а надмірний ріст R_a різко збільшує силу тертя й ризик поверхневих пошкоджень (ворсиння, подряпини, руйнування покривного шару). Оптимальна шорсткість забезпечує достатнє зчеплення для стабільного спрямування матеріалу без його механічного пошкодження.

4. Структурований мікрорельєф.

За наявності структурованого мікрорельєфу (мікроканавки, площадки, комбіновані профілі) реальна площа контакту відрізняється від номінальної. Це можна врахувати через коефіцієнт заповнення контактної площі η :

$$\eta = \frac{A_{\text{real}}}{A_{\text{nom}}}, \quad 0 < \eta \leq 1, \quad (1.2.19)$$

де A_{nom} – номінальна площа контакту (проекція); A_{real} – сумарна площа мікроконтактів.

Середній контактний тиск тоді:

$$p_{\text{nom}} = \frac{N}{A_{\text{nom}}}, \quad p_{\text{real}} = \frac{N}{A_{\text{real}}} = \frac{N}{\eta A_{\text{nom}}} = \frac{p_{\text{nom}}}{\eta}. \quad (1.2.20)$$

За раціонально підібраної структури мікрорельєфу η наближається до 1, що зменшує пікові локальні напруження і підвищує рівномірність розподілу тиску по фальцювальній зоні. Для періодичного мікрорельєфу у вигляді канавок з кроком s і шириною площадок контакту w коефіцієнт заповнення можна оцінити як

$$\eta = \frac{w}{s}, \quad (1.2.21)$$

що безпосередньо пов'язує геометрію мікрорельєфу з реальним контактним тиском та умовами деформування картону.

Наведені співвідношення є достатніми для орієнтовного добору радіуса профілю R та кута α з урахуванням гранично допустимих деформацій зовнішнього шару, оцінки впливу шорсткості R_a і параметрів мікрорельєфу (через η) на контактний тиск і силу тертя, а також для інтерпретації експериментальних даних щодо появи мікропошкоджень фальца та величини пружного відновлення згину.

1.2.2.3. Клейова секція фальцювально-склеювальної лінії: дозування адгезиву та формування адгезійних зон на клапанах інтегральних обкладинок

Клейова секція забезпечує формування заданої конфігурації адгезійних зон на клапанах розгортки та створює початкові умови для подальшого притискання й фіксації форми інтегральної обкладинки. Основними елементами є клейовий апарат (насос, резервуар, фільтри), дозувальні пристрої (форсунки, валки, сегментні ролики) та система керування, що синхронізує подачу клею зі швидкістю транспортної системи.

Нерівномірність нанесення адгезиву (зміна товщини шару, ширини смуги, розриви або перекоси сегментних зон) призводить до локальної різниці у жорсткості клейового шва та величині адгезійних сил. У результаті під час притискання виникає асиметрія зусиль, що спричиняє локальне зміщення клапанів відносно розгортки обкладинки. На рівні готового виробу це проявляється як геометричні дефекти (перекіс обкладинки відносно блоку, зміщення лінії згину).

Для опису процесу нанесення клею на сегментні ділянки клапанів можна використати модель рівномірного плівкового покриття, у якій середня товщина клейового шару h пов'язана з витратою клею Q , швидкістю транспортування v та шириною смуги b :

$$h = \frac{Q}{v \cdot b}, \quad (1.2.22)$$

де h – середня товщина клейового шару на клапані; Q – об’ємна витрата клею через форсунку (або систему форсунок); v – лінійна швидкість переміщення розгортки; b – ширина клейової смуги.

У реальних умовах товщина змінюється вздовж траєкторії руху клапана, формуючи функцію $h(x)$. Локальні відхилення $\Delta h(x)$ від заданого значення h_0 зумовлюють зміну жорсткості клейового шва $K_{\text{клей}}(x)$ та розподілу сил зчеплення, що впливають на положення клапана після затвердіння клею.

Надто тонкі ділянки $h \ll h_0$ можуть не забезпечити потрібну адгезійну міцність, тоді як надто товсті $h \gg h_0$ створюють нерівномірні «валики» клею, які при притисканні викликають місцеві перекоси.

Крім геометричних параметрів нанесення, важливими є реологічні властивості адгезиву (в’язкість, тиксотропія), температура, час відкритої витримки та точність синхронізації імпульсів подачі клею з рухом транспортної системи. Їх оптимізація дозволяє мінімізувати флуктуації товщини шару, стабілізувати форму сегментних зон та, відповідно, знизити ризик геометричних дефектів корінця.

1.2.2.4. Притискні циліндри: фіксація форми та розподіл тиску в зоні склеювання

Притискні циліндри є завершальним елементом фальцювально-склеювального вузла, що забезпечує стабілізацію геометрії зведених елементів розгортки після нанесення адгезиву та формування заданого контактного стану в зоні склеювання. Їх функціональне призначення полягає у:

1. фіксації форми клапанів та крайок відносно базової поверхні;
2. вирівнюванні поля контактного тиску по ширині адгезійної зони;
3. забезпеченні умов змочування та проникнення адгезиву в мікронерівності поверхонь за рахунок керованого притиску;
4. зниженні ризику зсуву клапанів у період відкритої витримки клею та на початковій стадії схоплювання.

У першому наближенні робота притискних циліндрів може бути описана співвідношенням середнього тиску

$$p = \frac{F}{A}, \quad (1.2.23)$$

де F – сила притискання, A – площа контакту.

Разом з тим, реальний контакт у зоні притискання є неоднорідним і визначається сукупністю чинників: пружною деформацією матеріалу розгортки, локальною товщиною адгезивного шару, мікрогеометрією поверхонь та геометрією циліндрів (радіус, твердість покриття, співвісність). Унаслідок цього навіть за сталої сили F можливі локальні відхилення тиску $p(x)$, які проявляються у вигляді нерівномірного змінання матеріалу, часткового видавлювання адгезиву або зміщення країв адгезійної зони. Відповідно, притискні циліндри формують умови реалізації клейового з'єднання, однак не визначають первинну геометрію згину.

Аналіз конструкції фальцювально-склеювальних систем свідчить, що першочерговим формоутворювальним елементом є фальцювальні планки, які задають траєкторію та інтенсивність деформацій у зоні згину і, як наслідок, визначають точність просторового зведення клапанів і крайок перед стадією притискання. Водночас обмежена кількість досліджень, присвячених впливу мікрогеометрії робочих поверхонь фальцювальних планок на контактну взаємодію при фальцюванні, ускладнює обґрунтований вибір їх матеріалу та поверхневого стану й унеможливорює комплексне керування якістю інтегральних обкладинок на етапі формоутворення.

З огляду на це, вплив притискних циліндрів на якість формоутворення доцільно розглядати опосередковано, через стабілізацію вже сформованої геометрії згину. Відхилення критеріїв точності зведення конструктивних елементів інтегральної обкладинки за лінійним параметром Δx та кутовим параметром $\Delta \varphi$ формуються переважно на етапі фальцювання, тоді як притискні циліндри лише фіксують набутий просторовий стан. Таким чином,

керування значеннями Δx та $\Delta \varphi$ має здійснюватися насамперед шляхом оптимізації геометрії та мікрогеометрії робочих поверхонь фальцювальних планок, що визначає актуальність подальших досліджень, спрямованих на формування зміцнювального мікрорельєфу.

1.2.3. Теоретичні аспекти тертя, зношування та мікрогеометрії робочих поверхонь фальцювальних планок

Фальцювальні планки працюють в умовах інтенсивного повторюваного тертя з різними видами картону. У літературі представлені класичні моделі трибології:

1) Модель Арчарда [15, 16]

$$V = k \frac{FN}{H}, \quad (1.2.24)$$

де V – об'єм зношування; F – навантаження; N – шлях тертя; H – твердість матеріалу планки; k – коефіцієнт зношування.

2) Вплив шорсткості та мікрогеометрії

Шорсткість впливає на:

- реальну площу контакту,
- локальне напруження,
- стабільність ковзання.

У дослідженнях поверхневої інженерії доведено, що структуровані мікрорельєфні поверхні здатні:

- зменшувати зношування;
- стабілізувати тертя;
- знижувати локальні піки напружень;
- підвищувати точність позиціонування матеріалу.

3) Мікрорельєф як керований елемент геометрії інструмента

Сучасні методи (лазерне текстурування, механічне мікроформування) дають можливість:

- створювати регулярні мікрорельєфні структури;
- змінювати напрям орієнтації мікроканалок;
- оптимізувати глибину й крок елементів.

Аналіз трибологічних моделей дозволяє стверджувати, що вплив мікрогеометрії поверхні інструмента на процес фальцювання нині практично не досліджений. Це формує наукову прогалину, яка безпосередньо пов'язана з необхідністю підвищення довговічності фальцювальних планок та стабільності процесу.

1.2.4. Узагальнення результатів аналізу та формування наукової проблеми

Систематизація результатів огляду літератури, аналізу конструктивних рішень фальцювально-склеювальних систем та експлуатаційних вимог до інтегральних обкладинок дозволяє сформулювати низку ключових положень, які окреслюють наукову проблему дослідження.

1. Комплексний характер процесу фальцювання.

Процес фальцювання інтегральних обкладинок визначається комплексом взаємопов'язаних механічних, трибологічних та адгезійних явищ, що розгортаються у зоні контакту «фальцювальна планка – картон – клейовий шар». Пружно-пластична деформація картону, контактні напруження, тертя ковзання та кочення, змочування й розтікання адгезиву формують єдину систему, чутливу до змін геометрії інструмента, режимів транспортування й властивостей матеріалів. Це вимагає не лише точного керування ізольованими параметрами, а й узгодженої оптимізації всього комплексу технологічних та конструктивних факторів.

2. Обмеженість наявних моделей.

Існуючі аналітичні та математичні моделі, що описують параметри згину, тертя та склеювання у фальцювальних вузлах, здебільшого розглядають інструмент як гладкий елемент із спрощеною макрогеометрією профілю. Такі підходи дозволяють оцінювати основні характеристики напружено-

деформованого стану (радіус згину, максимальні напруження, середній контактний тиск, товщину клейового шару), однак практично не враховують мікрогеометричних особливостей робочих поверхонь фальцювальних планок. У результаті втрачається можливість кількісно описати вплив шорсткості, напрямленого мікрорельєфу та локального перерозподілу контактних напружень на формування фальца й довговічність обкладинки.

3. Недооціненість мікрорельєфу як керованого фактору.

Мікрорельєф робочих поверхонь інструментів фальцювально-склеювальних систем нині переважно розглядається як супутня характеристика, що задається умовами виготовлення й зношування деталей. У більшості технологічних регламентів і досліджень він не позиціонується як цілеспрямовано керований фактор підвищення якості фальцювання. Відсутні узагальнені підходи до задання параметрів мікрорельєфу (висота, крок, форма мікроканалов, коефіцієнт заповнення площі контакту) з урахуванням властивостей картону та режимів роботи машини. Це становить суттєву прогалину в технологіях післядрукарської обробки, оскільки ігнорування мікрогеометрії позбавляє можливості цілеспрямовано керувати розподілом контактних напружень, тертям і умовами деформування у зоні фальца.

4. Потреба у науковому обґрунтуванні профілю та мікрорельєфу фальцювальних планок.

Вибір профілю фальцювальних планок (U-, V-, евольвентний та їх комбінації), а також послідовність та спосіб формування мікрорельєфу на їхніх робочих поверхнях нині, як правило, ґрунтується на емпіричному досвіді експлуатантів та рекомендаціях виробників обладнання. Відсутність систематизованої наукової бази не дозволяє пов'язати параметри профілю та мікрорельєфу з показниками напружено-деформованого стану картону, величиною пружного відновлення фальца, стійкістю до накопичення пошкоджень і зносом робочих поверхонь планок. Це зумовлює потребу у розробленні моделей і методик, які б забезпечували раціональний вибір геометрії (радіус, кут, форма профілю) та параметрів зміцнювального

мікрорельєфу залежно від типу матеріалу обкладинки та режимів роботи фальцювально-склеювальної системи.

5. Суперечність між вимогами до якості та наявними засобами її забезпечення.

З одного боку, сучасні вимоги до інтегральних обкладинок передбачають підвищену стабільність геометрії корінця, довговічність фальца та відсутність видимих дефектів при високошвидкісній обробці. З іншого боку, наявні конструктивні рішення й методи розрахунку фальцювальних планок не дають змоги цілеспрямовано врахувати й оптимізувати мікрогеометрію робочих поверхонь як активний інструмент керування процесом. Саме ця суперечність між зростаючими вимогами до якості фальцювання інтегральних обкладинок і недостатнім науковим опрацюванням впливу мікрорельєфу планок на напружено-деформований стан матеріалу та процес формування фальца і визначає наукову проблему даного дослідження.

Отже, наукову проблему можна сформулювати як необхідність розроблення теоретичних засад і практичних рекомендацій щодо формування та використання зміцнювального мікрорельєфу на профільних фальцювальних планках, які забезпечують керований розподіл контактних напружень, зменшення пошкоджуваності картону та підвищення довговічності інтегральних обкладинок при високошвидкісному фальцюванні.

Разом із мікрогеометрією робочих поверхонь фальцювальних планок істотний вплив на формування напружено-деформованого стану в зоні фальца мають адгезивні системи та конфігурація клейових шарів. Тип клею, його реологічні характеристики, товщина шару та схема нанесення змінюють локальну жорсткість клапанів і характер контактної взаємодії з профільним інструментом, що безпосередньо позначається на виникненні дефектів та довговічності інтегральних обкладинок. Це обґрунтовує необхідність окремого аналізу адгезивних матеріалів і способів їх нанесення у процесах фальцювання та склеювання інтегральних обкладинок, який здійснено у підрозділі 1.3.

1.3. Адгезивні матеріали та способи їх нанесення у процесі фальцювання інтегральних обкладинок

Спираючись на результати аналізу життєвого циклу інтегральних обкладинок (підрозділ 1.1) та теоретичних моделей процесів фальцювання й контактної взаємодії (підрозділ 1.2), подальший розгляд зосереджено на адгезивних матеріалах і схемах їх нанесення як окремій групі керованих факторів, що змінюють локальну жорсткість зони фальца й характер роботи фальцювальних планок.

Процес формування інтегральних обкладинок передбачає згинання клапанів і приклеювання їх до основи, що визначає геометричну точність, жорсткість та експлуатаційну довговічність видання. На перебіг цього процесу суттєво впливають три взаємопов'язані чинники: властивості адгезивів, спосіб їх нанесення та механіка контактної взаємодії картону з фальцювальною планкою. Систематизація світових досліджень у галузі клеєних з'єднань, сегментного нанесення адгезивів і трибології контактних систем дає змогу описати вплив цих чинників у кількісній формі та врахувати їх у загальній моделі фальцювання.

У сучасних виробничих умовах зона фальцювання є найбільш вразливою до появи дефектів – мікротріщин, біління, локального розшарування, асиметрії клапанів та порушення геометрії фальца. Це зумовлено анізотропністю картону, локальним перерозподілом жорсткості через клейовий шар, нелінійною пружно-пластичною поведінкою матеріалу у зоні максимальних деформацій та впливом мікрорельєфу профільної планки. З огляду на це особливого значення набуває кількісне моделювання взаємодії картону, клею та робочої поверхні фальцювальної системи.

Одним із визначальних чинників є поведінка адгезивного шару, який локально змінює механічні та трибологічні параметри картону в зоні фальца.

Властивості клею – його в'язкість, модуль пружності, швидкість структуроутворення та здатність до дисипації напружень – визначають стабільність процесу формування фальца, ризик виникнення дефектів та якість

кінцевого склеювання. Тому аналіз класів клеїв, їх реологічних характеристик і впливу на параметри згину є необхідною передумовою побудови адекватних механіко-математичних моделей процесу фальцювання.

1.3.1. Фізико-хімічні та реологічні властивості адгезивів і їх вплив на процес фальцювання інтегральних обкладинок

У сучасних технологіях виготовлення інтегральних обкладинок використовують кілька класів адгезивів, кожен з яких відрізняється структурними особливостями, реологічною поведінкою та характером впливу на локальні механічні властивості картону, зокрема в зоні формування клапанів і крайок:

– *ПВА-клеї (водні дисперсії полімерів)*

Є базовим типом адгезивів у книжково-журнальному виробництві. Вони мають середню в'язкість

$$\eta = (3-12) \times 10^3 \text{ mPa} \cdot \text{s}, \quad (1.3.1)$$

утворюють еластичну плівку після випаровування води, забезпечують добру адгезію до целюлозних волокон та мають відкритий час витримки ($t_0 = 5-20$ с).

– *Дисперсійні клеї з модифікаторами (каолін, ПЕВП, латекси)*

Модифікатори підвищують змочування, стійкість до зсувних деформацій і стабільність клею при високій швидкості.

Їх реологічна поведінка часто описується моделлю Бінгама [17, 18, 19]:

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma}, \quad (1.3.2)$$

де τ_0 – межа плинності; η_p – пластична в'язкість; $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву.

Це означає, що клей формує «структурний каркас» і не розтікається під навантаженням фальцювальної планки.

– *Гарячі клеї Hot-Melt (EVA, АРАО, SBS)*

Hot-Melt клеї працюють при температурах 120–180 °С та мають надзвичайно швидкий час схоплення (0,1–0,5 с).

Їхня в'язкість різко залежить від температури, що описується рівнянням Арреніуса [20]:

$$\eta(T) = \eta_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right), \quad (1.3.3)$$

де η_0 – передекспоненційний коефіцієнт; E_a – енергія активації; R – газова стала; T – температура (К).

Після нанесення важливим є процес охолодження клею:

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_{\text{середовища}}), \quad (1.3.4)$$

який визначає швидкість переходу клею у тверду фазу та формування міцності.

– *Поліуретанові клеї (PUR)*

PUR-адгезиви застосовують для матеріалів з низькою поверхневою енергією, а також у випадках підвищених вимог до довговічності.

Тверднення PUR описується кінетикою поліаддиції:

$$\frac{dT}{dt} = k(T)(1 - \alpha)^n, \quad (1.3.5)$$

де α – ступінь перетворення; n – порядок реакції;

$$k(T) = A \exp(-E_a / RT). \quad (1.3.6)$$

Зростання модуля PUR в процесі тверднення описує рівняння:

$$E(t) = E_0 + (E_\infty - E_0)\alpha(t), \quad (1.3.7)$$

що демонструє перехід клею від в'язкої до еластичної фази.

Для подальшого формалізованого аналізу технологічної поведінки клеїв у зоні фальца необхідно перейти від якісного опису до структурованого порівняння їх фізико-хімічних та реологічних параметрів. З цією метою у таблиці 1.3.1 наведено узагальнені властивості основних груп адгезивів, що використовуються у фальцюванні інтегральних обкладинок.

Таблиця 1.3.1.

Основні властивості адгезивів, що застосовуються у фальцюванні
інтегральних обкладинок

Клас адгезиву	Хімічна основа / тип системи	В'язкість η (20 °C), мПа·с	Час відкритості витримки t_0 , с	Час схоплення t_s , с	Товщина шару h_k , мкм	Переваги	Обмеження
ПВА-дисперсії	Полівінілацетат у водній дисперсії	$(3-12) \times 10^3$	5–20	20–60	8–25	Висока адгезія до целюлозних основ; екологічність; стабільний процес нанесення	Чутливість до вологості; ризик перезволоження картону
Модифіковані дисперсійні клеї	ПВА/акрилати з каоліном, ПЕВП, латексами	$(5-20) \times 10^3$	5–15	15–45	10–30	Краща контрольованість реології; адаптивність до різних типів картону	Вимоги до стабільності дисперсії; відкладення наповнювачів
Hot-melt (ЕВА, АРАО)	Термопластичні полімерні розплави	$(2-25) \times 10^2$	0,5–3	0,1–0,5	20–40	Миттєве схоплення; придатність до високих швидкостей	Підвищена крихкість у зоні фальца; чутливість до перегрівання
PUR-клеї	Поліуретанові одно- або двокомпонентні системи	$(5-30) \times 10^3$	3–10	10–60 (первинне), до 24 год повна полімеризація	10–30	Висока кінцева міцність; еластичність шва; стійкість до вологи і температур	Тривала полімеризація; висока вартість; вимогливість до дозування

Дані, наведені у таблиці 1.3.1, демонструють суттєву варіабельність фізико-хімічних і реологічних параметрів адгезивів, що визначають їхню ефективність у процесі фальцювання інтегральних обкладинок. В'язкість, модульні характеристики та часи твердіння безпосередньо впливають на локальну жорсткість клапана, величину контактного тиску та швидкість розвитку деформацій у зоні фальца.

Порівняння класів клеїв свідчить, що для матеріалів з високою жорсткістю та ламінованих структур (ПЕТ, ПП, УФ-лаки) доцільним є застосування Hot-melt або PUR-систем, тоді як для целюлозних основ економічно та технологічно оптимальними залишаються дисперсійні клеї. Узагальнені параметри таблиці забезпечують можливість кількісного підбору адгезиву під механічні моделі згину та контактної взаємодії, що є важливим для прогнозування дефектів фальцювання та оптимізації технологічного процесу.

Вплив клею на локальну жорсткість клапана полягає в тому, що клейовий шар змінює жорсткість згину картону, яка визначається ефективним модулем пружності системи «картон – клей»:

$$E_{ef} = \frac{E_c h_c^3 + E_k h_k^3}{h_c^3 + h_k^3}, \quad (1.3.8)$$

де E_c , h_c – модуль пружності та товщина картону; E_k , h_k – модуль та товщина адгезиву.

Збільшення жорсткості на 10–20 % змінює криву згину, зменшує мінімальний радіус фальца та підвищує імовірність біління через локальні розтягувальні деформації у зовнішньому шарі картону.

Реологічні параметри клею також впливають на кінетику розвитку деформацій у зоні згину, зокрема на зсувний компонент, який є суттєвим у зонах контакту з фальцювальною планкою.

Урахування наведених механічних і реологічних ефектів є необхідною умовою для правильного вибору адгезиву залежно від типу картону та характеру його поверхні.

Саме поєднання жорсткості основи, властивостей покриття та реологічної поведінки клею визначає стабільність формування фальца та ризик дефектів. Узагальнені рекомендації щодо відповідності адгезивів різним матеріалам інтегральних обкладинок наведено в таблиці 1.3.2.

Таблиця 1.3.2.

Рекомендовані області застосування адгезивів для різних типів картону та покриттів інтегральних обкладинок

Клас адгезиву	Тип картону / основи	Наявність покриття / обробки	Рекомендована область застосування	Особливі зауваження щодо процесу фальцювання
ПВА- дисперсії	Офсетні й книжково- журнальні картони щільністю 200–300 г/м ²	Без покриття або з легким крейдуванням	Стандартні інтегральні обкладинки з прямим друком; клапани середньої ширини; лінії з помірною швидкістю	Забезпечують достатню міцність і еластичність фальца; потребують контролю вологості та часу сушіння
Модифіковані дисперсійні клеї	Крейдовані, білені й високоякісні хром-ерзац картони, 220– 320 г/м ²	Суцільне крейдування, часткові УФ- лаки, тонкі поліграфічні покриття	Обкладинки з інтенсивним здруковуванням та частковим лакуванням; випадки, коли потрібна підвищена стабільність фальца	Краща змочуваність поверхонь; доцільно застосовувати сегментне нанесення для зменшення жорсткості клапанів
Hot-melt (ЕВА, АРАО)	Картон високої жорсткості, ламінований картон, комбіновані основи	Ламінування плівками (ПП, ПЕТ), суцільне UV-лакування	Високошвидкісні лінії фальцювання та склеювання; серійні тиражі з підвищеними вимогами до продуктивності	Потребують точного контролю температури розплаву; бажано обмежувати товщину шару, щоб уникати крихкості фальца та мікротріщин
PUR-клеї	Багатошарові, ламіновані, полімервмісні основи; комбіновані матеріали «картон + плівка»	Ламінування, високоглянець, металізовані плівки, складні покриття	Обкладинки з високими вимогами до довговічності та стійкості до вологи/температур; преміальні видання, каталоги, подарункові книги	Забезпечують високу кінцеву міцність та еластичність шва; необхідно враховувати тривалий час полімеризації та ретельно налаштовувати

				тиск у зоні фальцювання
Спеціальні адгезиви з пониженою жорсткістю шва (модифіковані ПВА/латекси)	Тонкі та середньої щільності картони (180–260 г/м ²), чутливі до розриву	Часткові лакування, плашковий друк у зоні фальца	Видання, де критичною є відсутність біління та тріщин у місці згину (дитячі книги, арт-видання)	Доцільні при сегментному нанесенні; дозволяють зменшити локальні напруження та покращити зовнішній вигляд фальца

Результати, узагальнені у Таблиці 1.3.2, показують, що вибір адгезиву повинен здійснюватися не лише за реологічними параметрами, а й з урахуванням структури картону, типу поліграфічного покриття та вимог до кінцевої якості обкладинки. Різні клеєві системи демонструють неоднакову сумісність із крейдованими, ламінованими, композитними та полімервмісними матеріалами, що впливає на рівномірність розподілу напружень у зоні фальца та ризик появи дефектів – біління, мікротріщин, локальних змінань.

Вказані рекомендації дозволяють технологічно обґрунтовано визначати оптимальний тип адгезиву залежно від конструкції інтегральної обкладинки, режимів фальцювання та умов експлуатації. Це забезпечує підвищення довговічності з'єднання та зменшення ймовірності технологічних відхилень під час виготовлення продукції.

1.3.2. Технології нанесення адгезивів: суцільні, вибірккові та сегментні методи

У процесі фальцювання інтегральних обкладинок характер та параметри нанесення адгезиву визначають локальну жорсткість клапана, величину контактного тиску у зоні взаємодії з фальцювальною планкою, а також кінетику розвитку деформацій під час згину.

Тому вибір технології нанесення клею є важливим фактором, що впливає як на експлуатаційні властивості готової продукції, так і на стабільність

високошвидкісних фальцювальних ліній. У сучасних поліграфічних системах застосовують три базові підходи: суцільне, вибіркове та сегментне нанесення, кожен із яких має свої переваги, обмеження та особливості механіки взаємодії з картоном [21, 32].

1. *Суцільне нанесення адгезиву* передбачає формування неперервного клейового шару товщиною h_k по всій довжині та ширині клапана інтегральної обкладинки [21, 32].

Такий підхід традиційно застосовується у виробництві, коли необхідно забезпечити максимальну адгезійну міцність і мінімізувати ризик відшарування клапанів, особливо у разі використання жорстких, ламінованих або багатошарових матеріалів.

Рівномірне покриття дає однорідний контакт поверхонь та стабільну лінію склеювання, що є важливим для експлуатаційної надійності обкладинки під час багаторазового відкривання й закривання. На рис. 1.3.1 наведено схему суцільного нанесення адгезиву [21, 32].

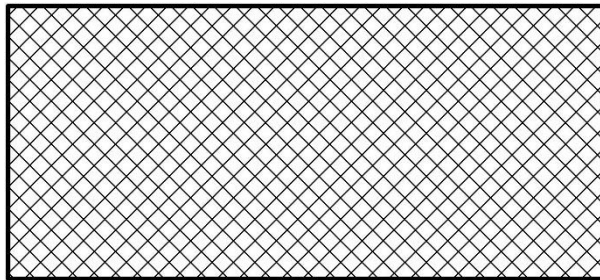


Рис. 1.3.1. Схема суцільного нанесення адгезиву на фрагмент інтегральної обкладинки

Переваги суцільного нанесення [21, 32]:

- Однорідність контактної взаємодії. Безперервний шар адгезиву забезпечує рівномірний розподіл тиску, що сприяє формуванню стабільного з'єднання без локальних зон ослаблення.

- Стабільна геометрія шва. Суцільна лінія склеювання забезпечує прогнозовану жорсткість та рівномірний розподіл деформацій у зоні фальца.

– Підвищена міцність з'єднання. Особливо важлива для обкладинок з високою щільністю, ламінуванням або УФ-лаками, де необхідний значний запас міцності.

Недоліки (визначальні для фальцювання) [21, 32]:

1. Надмірна витрата адгезиву, що підвищує собівартість виробництва на 15–25 %.

2. Подовжений час висихання, який збільшує вимоги до транспортувальних систем.

3. Ефект "запливання" адгезиву в зону фальца, що підвищує локальну жорсткість та сприяє появі біління.

З наукової точки зору це пов'язано з тим, що неперервний шар клею збільшує ефективну вигинальну жорсткість E_{eff} , яка визначається виразом:

$$E_{eff} = E_c + \left(\frac{h_k}{h_c} \right)^3 (E_k + E_c), \quad (1.3.9)$$

що призводить до нелінійного збільшення опору згину й ускладнення формування фальца при великих швидкостях.

2. Вибіркове (pattern) нанесення адгезиву передбачає подачу клею не по всій площині клапана, а лише в окремі функціонально важливі зони, конфігурація яких визначається конструкцією обкладинки та режимами фальцювально-склеювальної машини [21, 32].

Такий підхід дозволяє зменшити витрати адгезиву, знизити локальне зростання жорсткості клапана та забезпечити достатню міцність з'єднання там, де вона дійсно необхідна.

На рис. 1.3.2 наведено схему вибіркового нанесення адгезиву [21, 32], у якій заштриховані елементи позначають ділянки, що підлягають нанесенню клею. Такі ділянки можуть мати різну форму – поздовжню, поперечну, кутову чи комбіновану. Їх розташування визначається з урахуванням геометрії клапана, напрямку згину та необхідної міцності у конкретних зонах.

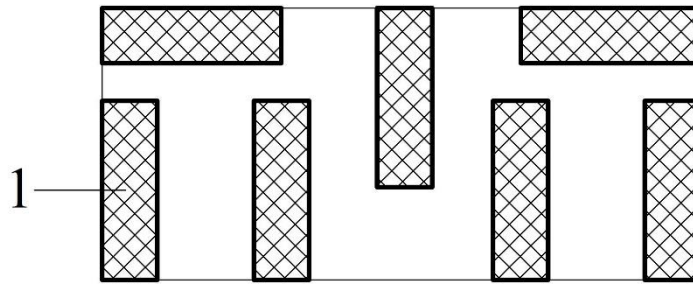


Рис. 1.3.2. Схема вибіркового нанесення адгезиву на фрагмент інтегральної обкладинки: 1 – ділянки вибіркового нанесення адгезиву

На відміну від сегментного нанесення, де клей подається у вигляді регулярної повторюваної структури (сітки, ритмічних блоків, модулів), вибіровий підхід формує *просторово нерегулярний* розподіл адгезиву [21, 32]. Це означає, що клей розміщується лише у тих місцях, де він виконує конструктивну або технологічну функцію – посилює кутові ділянки, забезпечує додаткову фіксацію в зоні високих згинальних напружень або компенсує анізотропію картону. Такий спосіб дозволяє досягти оптимального компромісу між міцністю та технологічною гнучкістю [21, 32]:

- забезпечується надійне з'єднання у ключових точках;
- зберігається гнучкість картону у зонах, вільних від клею;
- знижується ймовірність біління та мікротріщин під час фальцювання;
- зменшується ризик локального зминання та нерівномірного стискання у зоні фальца.

Для опису жорсткості клапана в точці x уздовж довжини фальца можна ввести локальний ефективний модуль згину:

$$E_{ef}(x) = E_c + \chi(x)(E_k - E_c), \quad (1.3.10)$$

де E_c – модуль пружності картону; E_k – модуль пружності клейового шару; $\chi(x)$ – індикаторна функція наявності клею:

$$\chi(x) = \begin{cases} 1, & x \in \Omega_k, \\ 0, & x \in \Omega_k^c, \end{cases} \quad (1.3.11)$$

Ω_k – сукупність ділянок, на які нанесено клей (заштриховані області на рис. 1.3.2.2).

У такій постановці:

- у зонах без клею $\chi(x)=0$ жорсткість дорівнює модулю картону $E_{ef}(x)=E_c$;
- у зонах з вибіркоким нанесенням клею $\chi(x)=1$ локальна жорсткість підвищується до $E_{ef}(x)=E_k$ (або до проміжного значення, якщо враховувати шарувату будову).

За потреби можна записати також усереднений по довжині клапана модуль:

$$E_{ef} = E_c + \varphi_k(E_k - E_c), \quad \varphi_k = \frac{S_k}{S_{zag}}, \quad (1.3.12)$$

де S_k – сумарна площа ділянок з клеєм; S_{zag} – повна площа клапана, φ_k – частка поверхні, покрита адгезивом.

У порівнянні з суцільним нанесенням, вибіркоче нанесення клею зменшує витрати адгезиву на 20–40 %, а порівняно з сегментним – забезпечує більшу технологічну свободу у виборі форм і розмірів клейових зон, але не створює регулярної структури, необхідної для стабілізації локальної жорсткості [21, 32].

Саме ця нерівномірність робить вибіркоче нанесення особливо ефективним у випадках складних за формою клапанів або при використанні картону зі значною анізотропією.

З погляду механіки вибіркоче нанесення створює градієнтну жорсткість, унаслідок чого змінюється розподіл кривини та контактного тиску у зоні фальца.

3. Сегментне нанесення адгезиву є одним із найефективніших технологічних підходів для фальцювання інтегральних обкладинок, особливо у випадках використання тонких, жорстких або чутливих до згину картонів [21, 32].

На відміну від суцільного чи вибіркового нанесення, цей метод забезпечує кероване формування локальної жорсткості клапана завдяки

періодичному чергуванню клейових сегментів шириною b , b_1 та проміжків s , s_1 (рис. 1.3.3), що створює повторювану мікроструктурну конфігурацію по довжині клапана.

Таке компонування клейового шару дозволяє змінювати механічну відповідь матеріалу в зоні фальца, оптимізуючи розподіл деформацій та підвищуючи стабільність процесу формування згину при високошвидкісному фальцюванні. На рис. 1.3.3 наведено схему сегментного нанесення адгезиву [21, 32]:

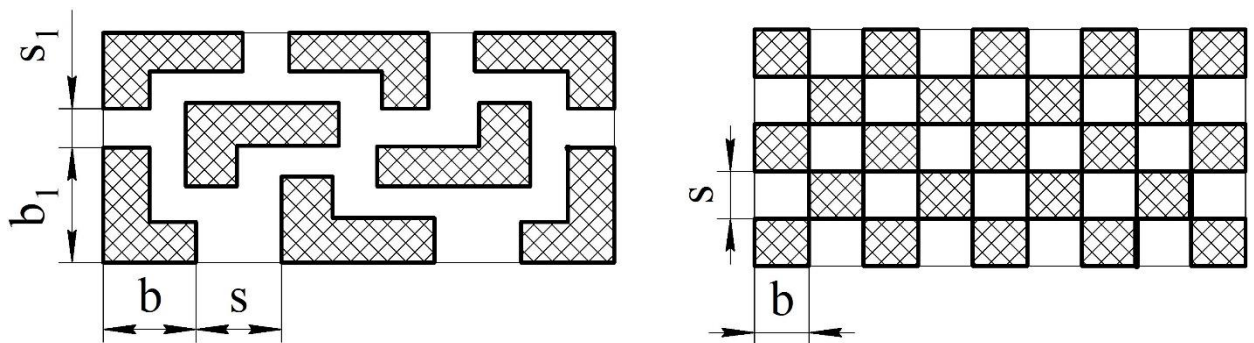


Рис. 1.3.3. Схема сегментного нанесення адгезиву на клапани інтегральної обкладинки.

Переваги сегментного нанесення [21, 32]:

1. Зменшення витрат адгезиву на 30–50 %. Завдяки наявності проміжків між сегментами клей розподіляється економніше, без істотного зниження адгезійної міцності кінцевого з'єднання.

2. Зменшення локальної жорсткості клапана. Відсутність суцільного шару знижує ефективну вигинальну жорсткість у зоні фальца, що зменшує ймовірність появи біління, мікротріщин, локального розшарування та інших дефектів.

3. Компенсація анізотропії картону. Внаслідок регулювання співвідношення b/s можна адаптувати розподіл жорсткості під орієнтацію волокон і технологічні властивості конкретного виду картону.

4. Покращене дисипативне згасання напружень. Періодична структура клейового шару сприяє більш рівномірному перерозподілу контактних

напружень, що особливо важливо при фальцюванні з високими швидкостями та значними локальними навантаженнями.

Недоліки та технологічні обмеження:

1. Нерівномірний розподіл контактного тиску. Сегментна структура призводить до періодичного зростання та зменшення контактних зусиль уздовж лінії фальца. Це потребує ретельного добору параметрів профілю фальцювальної планки та її мікрогеометрії для забезпечення стабільності формування згину.

2. Підвищені вимоги до точності дозування. Для ефективної роботи необхідно забезпечити високоточне формування сегментів із постійною шириною b , відстанню між ними s та стабільною товщиною шару h_k . Відхилення у цих параметрах можуть призвести до асиметрії фальца або нерівномірного приклеювання клапанів.

Математична модель сегментного нанесення

Середня вигинальна жорсткість клапана з періодичною структурою адгезиву може бути описана формулою:

$$E_{efseg} = E_c + \frac{b}{b+s} (E_k - E_c), \quad (1.3.13)$$

де E_c – модуль картону; E_k – модуль клейового шару; $b/(b+s)$ – коефіцієнт заповнення сегментами.

Ця модель показує, що зменшення ширини сегментів (b) або збільшення проміжків (s) знижує жорсткість, що сприяє формуванню фальца без пошкоджень.

Для високошвидкісного згину локальна модифікація жорсткості змінює кривину за законом:

$$k(x) = \frac{M(x)}{E_{efseg} I}, \quad (1.3.14)$$

де $M(x)$ – згинальний момент уздовж довжини клапана.

Сегментне нанесення формує періодичну структуру локальної жорсткості клапана, що дозволяє контролювати механіку згину та знижувати ймовірність дефектів фальцювання.

Сегментне нанесення адгезиву поєднує високу технологічну гнучкість із можливістю тонкого керування механічними властивостями клапана обкладинки.

У контексті дослідження технологічного забезпечення якості фальцювання та стабілізації напружено-деформованого стану матеріалу цей метод є найбільш перспективним.

Його ефективність визначається здатністю зменшувати локальні деформації, оптимізувати контактну взаємодію з фальцювальною планкою та забезпечувати раціональне використання адгезиву без втрати експлуатаційної якості з'єднання.

З огляду на викладені вище механічні, реологічні та технологічні чинники, вибір способу нанесення адгезиву має здійснюватися не лише з позицій економії клею чи спрощення технологічного процесу, але й з урахуванням його впливу на локальну жорсткість клапана, характер напружено-деформованого стану в зоні фальца та ймовірність появи дефектів під час фальцювання.

Узагальнення отриманих результатів дозволяє порівняти три основні технологічні підходи – суцільне, вибіркоче та сегментне нанесення – з позицій їх ефективності, надійності та придатності для різних типів картону та конструкцій інтегральних обкладинок. Для систематизації цих відмінностей наведено порівняльну таблицю 1.3.3.

Таблиця 1.3.3.

Порівняння способів нанесення адгезиву

Критерій	Суцільне нанесення	Вибіркове нанесення	Сегментне нанесення
Принцип нанесення	Формується неперервний шар адгезиву по всій площі клапана	Клей наноситься лише в окремі технологічно значущі ділянки	Клей наноситься у вигляді повторюваних сегментів однакової ширини та кроку

Структура покриття	Однорідна, без розривів	Нерегулярні фрагменти різної форми та розміру	Строго періодична структура з регулярним чергуванням сегментів та проміжків
Вплив на жорсткість клапана	Максимальне збільшення локальної жорсткості; ризик біління та мікротріщин	Локальне підвищення жорсткості у вибраних зонах	Контрольоване зниження жорсткості по довжині клапана; менше дефектів згину
Адгезійна міцність	Найвища, рівномірна по всій площі	Висока лише у зонах нанесення	Достатня для фальцювання, рівномірне закріплення по довжині
Точність формування фальца	Стабільна, але може погіршуватися через надмірну жорсткість	Висока, залежить від точності позиціонування	Підвищена стабільність лінії фальца при високих швидкостях
Витрати клею	Найбільші (надлишкове споживання 30–50 %)	Менші на 20–40 %	Економія клею 30–50 %
Ризики дефектів	“Запливання” клею на край фальца, нерівномірність сушіння	Дефекти в разі зміщення зон нанесення	Мінімальні; вирівнюється напружено-деформований стан
Типові сфери застосування	Товсті та ламіновані картонні основи, вимога максимальної міцності	Локальне кріплення, складні форми клапанів	Високошвидкісне фальцювання інтегральних обкладинок, стабілізація фальца

Суцільне нанесення забезпечує найвищу адгезійну міцність і рівномірність шва, однак значно збільшує жорсткість клапана, що може викликати дефекти згину.

Вибіркове нанесення оптимізує витрату клею та зменшує вплив на механіку фальцювання, але потребує високої точності позиціонування. Сегментне нанесення є найбільш технологічно ефективним для інтегральних обкладинок, оскільки дозволяє керувати локальною жорсткістю і стабілізувати лінію фальца при високих швидкостях.

У сукупності ці три методи формують базу для вибору оптимальної конфігурації клейового шару залежно від матеріалу обкладинки та вимог до її міцності й геометричної точності.

З аналізу випливає, що технологія сегментного нанесення є найбільш придатною для високошвидкісного фальцювання інтегральних обкладинок,

оскільки дозволяє селективно керувати локальною жорсткістю картону та знижувати рівень напружень у зоні фальца.

Формалізована математична модель сегментного нанесення створює основу для оптимізації конструкції фальцювальних планок, що буде розглянуто у наступних підрозділах.

Проведений аналіз свідчить про відсутність комплексного теоретичного опису процесу фальцювання інтегральних обкладинок з урахуванням мікрогеометрії робочих поверхонь фальцювальних планок та умов контактної взаємодії інструмента з матеріалом. Це обумовлює необхідність розроблення механіко-математичної моделі, спрямованої на опис формування напружено-деформованого стану в зоні згину. Зазначені положення визначають перехід до теоретичного обґрунтування керованих параметрів процесу фальцювання, що становить зміст наступного розділу дисертації.

Висновки до Розділу 1

1. Аналіз технології виготовлення інтегральних обкладинок показав, що фальцювання є визначальною стадією формоутворення, на якій закладаються геометрична точність, зовнішній вигляд і передумови експлуатаційної надійності готової продукції.

2. Встановлено, що характерні дефекти інтегральних обкладинок (перекоси клапанів, хвилястість лінії фальца, локальне неповне приклеювання, біління матеріалу) мають стійкий причинно-наслідковий зв'язок з умовами фальцювання та станом робочих поверхонь фальцювальних планок.

3. Показано, що якість приклеювання клапанів і крайок значною мірою формується ще на етапі фальцювання, оскільки точність просторового зведення елементів визначає рівномірність контактної взаємодії та ефективність реалізації адгезійного зв'язку.

4. Обґрунтовано доцільність використання лінійного (Δx) та кутового ($\Delta \varphi$) показників зведення клапанів як універсальних критеріїв кількісного оцінювання геометричної якості інтегральних обкладинок.

5. Систематизація дефектів підтвердила, що їх домінуючі прояви мають контактно-механічну природу та зумовлені нерівномірністю контактного тиску, варіабельністю тертя і локальними концентраціями напружень у зоні згину.

6. Виявлено, що зношування робочих поверхонь фальцювальних планок призводить до зниження повторюваності контактної взаємодії та стабільності процесу фальцювання, що проявляється у зростанні варіабельності геометричних показників у межах тиражу.

7. За результатами огляду сформульовано вимоги до якості деталей механізму фальцювання (геометрії, стану поверхонь, стабільності контактної взаємодії) та обґрунтовано необхідність подальшого науково-технічного опрацювання керованих параметрів фальцювального вузла, що реалізується в наступному розділі дисертації.

РОЗДІЛ 2.

НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ЗАСАДИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ФАЛЬЦЮВАЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ФАЛЬЦЮВАЛЬНИХ ПЛАНОК ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ІНТЕГРАЛЬНИХ ОБКЛАДИНОК

Результати аналізу сучасного стану технології виготовлення інтегральних обкладинок, виконаного в Розділі 1, засвідчили, що стабільність процесу фальцювання та умови контактної взаємодії у фальцювальному вузлі є визначальними чинниками формування геометричної якості та довговічності готової продукції. Встановлено, що характерні дефекти фальцювання та приклеювання клапанів і крайок мають чітко виражену причинно-наслідкову залежність від геометрії профільних фальцювальних планок, стану їх робочих поверхонь і режимів контактної взаємодії з картонними матеріалами.

У зв'язку з цим у даному розділі розглядаються науково-технічні засади вдосконалення фальцювального механізму, спрямованого на підвищення стабільності формоутворення інтегральних обкладинок.

Під вдосконаленням у роботі розуміється комплекс конструктивних і технологічних рішень, що включає оптимізацію геометрії профільних фальцювальних планок, вибір матеріалів та інструментів їх оброблення, а також застосування технологій формування зміцнювального мікрорельєфу робочих поверхонь.

Основна увага зосереджена на аналізі кінематичних, силових і трибологічних параметрів процесу фальцювання, які визначають контактні навантаження, умови ковзання та інтенсивність зношування фальцювальних планок. Це дозволяє обґрунтувати вибір технологічних схем і параметрів оброблення, що забезпечують стабільну роботу фальцювального вузла в умовах високошвидкісного формоутворення.

Результати, отримані в межах цього розділу, формують вихідні положення та систему керованих параметрів для подальшого механіко-

математичного моделювання і експериментальних досліджень, представлених у наступних розділах дисертації.

2.1. Контактно-механічні передумови дефектоутворення та керовані параметри фальцювальних планок

Порушення умов контактної взаємодії у фальцювальному вузлі на етапі формування розгортки інтегральної обкладинки зумовлюють виникнення просторових і геометричних відхилень, які мають тенденцію до накопичення та подальшої фіксації у готовому виробі. Зокрема, нестабільність процесу згину та неоднорідність контактних навантажень у зоні взаємодії з профільними фальцювальними планками проявляються у вигляді перекосів елементів обкладинки, нерівномірності кантів, локальних напусків та зон зниженого клейового контакту [42].

Характер і інтенсивність таких дефектів визначаються сукупною дією контактних-механічних чинників, що формуються безпосередньо у процесі фальцювання та залежать від геометрії планок, умов ковзання і локальних деформацій матеріалу.

З огляду на це, забезпечення якості інтегральних обкладинок доцільно розглядати як задачу стабілізації формоутворення згину та підвищення повторюваності просторового зведення елементів у межах заданих допусків, що кількісно може оцінюватися через геометричні критерії зведення (зокрема, лінійний Δx та кутовий $\Delta \varphi$) і показники ефективності клейового контакту.

Для наочного пояснення геометричних показників зведення та особливостей формування кантів на готовому виробі на рис. 2.1.1 наведено узагальнену схему інтегральної обкладинки з книжковим блоком. На схемі виділено основні елементи конструкції обкладинки та зони кантування, геометрична точність яких безпосередньо залежить від стабільності процесу фальцювання та точності просторового зведення клапанів і крайок. Саме у цих зонах відхилення, що виникають на стадії формування згину,

проявляються у вигляді порушення симетрії кантів і перекосів конструктивних елементів [42].

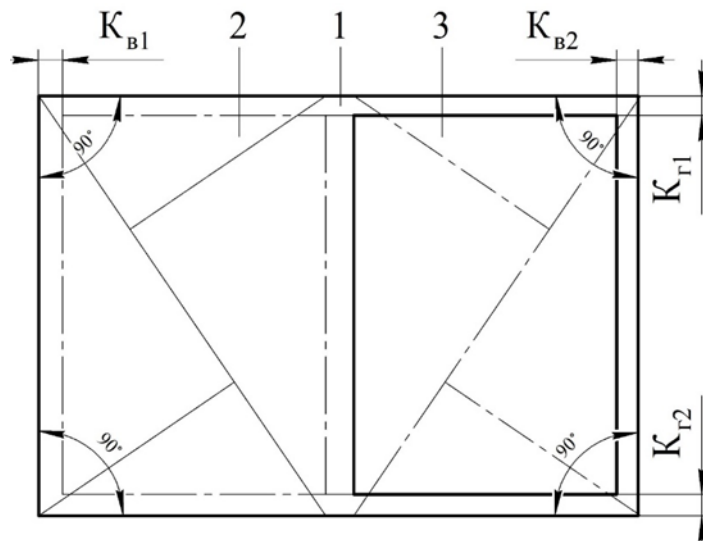


Рис. 2.1.1. Схема інтегральної обкладинки з книжковим блоком і елементами кантування: 1 – інтегральна обкладинка; 2 – ліва частина обкладинки до приклеювання книжкового блоку; 3 – права частина обкладинки з приклеєним книжковим блоком; K_{B1} – кант вертикальний лівий; K_{B2} – кант вертикальний правий; $K_{Г1}$ – кант горизонтальний верхній; $K_{Г2}$ – кант горизонтальний нижній [42].

Представлена схема відображає ідеалізований стан геометрії інтегральної обкладинки. У реальних умовах виробництва навіть незначні порушення умов фальцювання призводять до візуально помітних відхилень кантів, що легко ідентифікуються на готовому виробі. Для ілюстрації характеру таких відхилень та їх просторового прояву на рис. 2.1.2 наведено макет книги в інтегральній оправі з позначенням зовнішніх контурних ліній кантів [42].

Аналіз геометрії кантів, представлених на рис. 2.1.2, свідчить, що їх нерівномірність формується ще на стадії згинання матеріалу обкладинки та є наслідком неоднорідності деформацій уздовж лінії фальца. Це вказує на визначальну роль траєкторії згину, що задається геометрією профільних фальцювальних планок, зокрема характером зміни кривизни та її градієнта вздовж контактної зони [42].

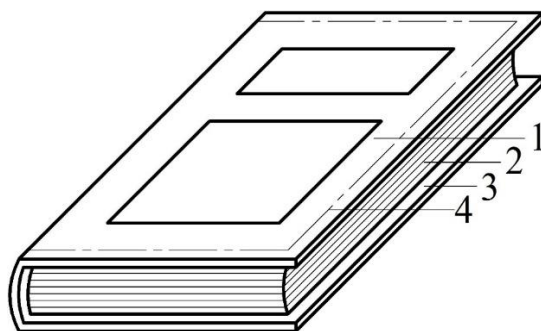


Рис. 2.1.2. Макет книги в інтегральній оправі з позначенням елементів кантування: 1 – інтегральна обкладинка (оправа); 2 – книжковий блок; 3 – канти інтегральної обкладинки; 4 – зовнішні контурні лінії кантив [42].

Для обґрунтування вибору керованих параметрів і технологічних рішень процес фальцювання інтегральних обкладинок доцільно інтерпретувати в термінах контактної взаємодії «фальцювальна планка – матеріал обкладинки», де вирішальними є: траєкторія згину (кривина профілю), контактний тиск, умови тертя/ковзання та пружне відновлення після зняття навантаження. Саме сукупність цих чинників формує механічні передумови дефектоутворення і визначає напрями вдосконалення профілю та поверхневого стану фальцювальних планок.

2.1.1. Кривина профілю як керований чинник деформацій і дефектів матеріалу

Траєкторію згину, що задається профілем фальцювальної планки, можна описати кутом повороту перерізу $\theta(s)$ вздовж контактної дуги s , а локальну кривину – співвідношенням $k(s)=d\theta/ds$. У подальшому s інтерпретується як координата вздовж лінії (дуги) контакту, $\theta(s)$ – як кут повороту перерізу заготовки, а $k(s)$ – як локальна кривина згину. У такій постановці раціональний вибір профілю зводиться до керування не лише рівнем кривини $k(s)$, а й її градієнтом $k'(s)$, оскільки локальні «піки» $k(s)$ та високі значення $|k'(s)|$ спричиняють концентрацію деформацій у зовнішніх шарах матеріалу. Для пластинчасто-оболонкової заготовки товщиною h поздовжня деформація

волокна пропорційна $k(s)$, а напруження згину – $E \cdot \varepsilon$. Отже, у зонах різкого зростання кривини зростають $\varepsilon_{\max}(s)$ та $\sigma_{\max}(s)$, що створює механічні передумови біління, мікротріщин покриття та надривів картону [42].



Рис. 2.1.3. Концептуальний розподіл кривини згину $k(s)$ уздовж контактної довжини для різних профілів фальцювальних планок: V-подібного, U-подібного, евольвентного та комбінованого; s – координата вздовж лінії контакту «фальцювальна планка – клапан», $k(s)=d\theta/ds$ – локальна кривина згину [42]

Практично це обґрунтовує вимогу: обмежувати $k(s)$ і мінімізувати $|k'(s)|$ за рахунок профілів із плавною зміною кривизни (зокрема евольвентних або комбінованих). Такий підхід зменшує пікові деформації/напруження, підвищує повторюваність згину та знижує імовірність контактної зумовлених дефектів. Таким чином, обґрунтованим є застосування профілю з плавною зміною кривизни (евольвентного або комбінованого), який зменшує пікові деформації та підвищує повторюваність формоутворення фальца.

2.1.2. Розподіл контактного тиску як джерело локальних пошкоджень

Контакт «планка–матеріал» доцільно описувати розподілом нормального тиску $p(s)$. Для дефектоутворення важливими є не лише пікові значення $p_{\max}$, а

й градієнт тиску $\max|dp/ds|$, який відображає «різкість» переходу між режимами навантаження вздовж контакту. Великі значення $\max|dp/ds|$ підсилюють локальні концентрації напружень у зоні фальца і сприяють зародженню тріщин/надривів, особливо за наявності жорстких піків кривини та нерівномірного тертя [42].



Рис. 2.1.4. Концептуальний розподіл контактної тиску $p(s)$ уздовж контактної довжини у зоні фальцювання: s – координата вздовж лінії контакту, $p(s)$ – локальний контактний тиск [42].

Звідси випливає технологічно важлива вимога до вдосконалення планок: вирівнювати $p(s)$ і зменшувати локалізацію навантажень у зоні згину, що може досягатися як геометрією профілю, так і керуванням мікрогеометрією робочої поверхні. У конструктивно-технологічному сенсі це означає необхідність геометричного «згладжування» контакту та керування мікрогеометрією робочої поверхні для вирівнювання $p(s)$ у зоні згину.

2.1.3. Тертя та нестабільне ковзання як причина перекосів і нерівної лінії згину

Дотичні контактні сили визначаються співвідношенням $F_{t(s)} = \mu(s) \cdot p(s)$, де $\mu(s)$ залежить від мікрогеометрії поверхні планки (шорсткість/мікрорельєф) і

стану покриття матеріалу обкладинки. Якщо $\mu(s)$ істотно змінюється вздовж контакту або сила тертя зменшується зі зростанням швидкості ковзання, виникає режим нестабільного ковзання (stick–slip). Ривкові переходи «прилипання–ковзання» порушують повторюваність траєкторії згину та зумовлюють нерівномірну лінію фальца і кутові зміщення/перекуси клапанів, які на готовому виробі проявляються як геометричні відхилення $\Delta\varphi$ і вторинні зміни кантів [42].

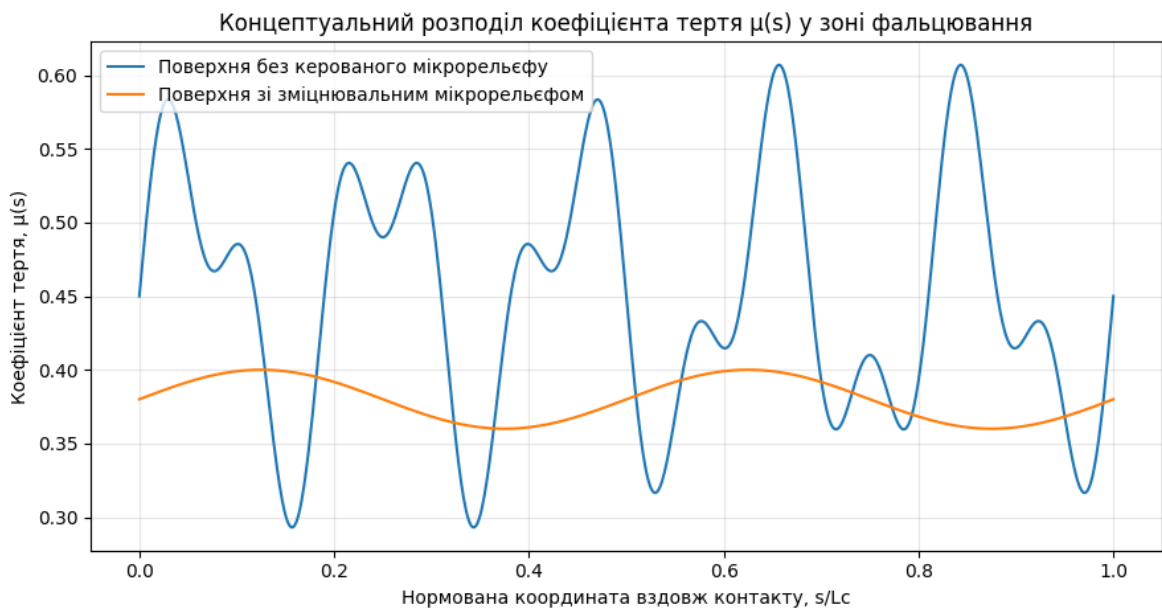


Рис. 2.1.5. Концептуальний розподіл коефіцієнта тертя $\mu(s)$ уздовж контактної довжини у зоні фальцювання: s – координата вздовж лінії контакту, $\mu(s)$ – локальний коефіцієнт тертя [42]

Отже, підвищення якості інтегральних обкладинок потребує не стільки “зменшення тертя взагалі”, скільки стабілізації тертя: зниження дисперсії $\mu(s)$ та неоднорідності $|d\mu/ds|$ уздовж контактної довжини. Це обґрунтовує доцільність формування на робочих поверхнях планок керованого мікрорельєфу, який стабілізує $\mu(s)$ уздовж контакту та знижує ймовірність режимів stick–slip.

2.1.4. Пружне відновлення та залишкові деформації як чинник розклеювання і хвилястості

Після зняття навантаження частина кривини відновлюється (springback), причому нерівномірність $\Delta k(s)$ уздовж клапана формує залишкові деформації, що проявляються як хвилястість крайок та погіршення геометрії зони склеювання. Якість приклеювання доцільно пов'язувати з ефективною площею клейового контакту A_c , яка зменшується за появи ділянок із локальним зазором $g(s) > 0$. Таким чином, нестабільний згин і неоднорідний springback безпосередньо переводяться у технологічний результат: зниження $A_c \rightarrow$ зменшення міцності з'єднання $\rightarrow$ локальне/часткове розклеювання. Тому технологічні рішення мають бути спрямовані на зменшення нерівномірності відновлення $\Delta k(s)$ шляхом раціональної форми профілю та стабільних умов контакту, що підвищує ефективність клейового з'єднання.

2.1.5. Узагальнення: керовані параметри планок і прогнозований поліграфічний ефект

Наведена інтерпретація показує, що домінують дефекти формоутворення та приклеювання інтегральних обкладинок мають спільну контактну-механічну природу і визначаються поєднанням: I – пікових деформацій, зумовлених кривиною та її градієнтом; II – локалізації контактного тиску; III – просторової неоднорідності тертя та режимів stick–slip; IV – нерівномірного пружного відновлення. Усі ці чинники є функціями геометрії профілю та мікрогеометричного стану робочих поверхонь фальцювальних планок, тобто належать до технологічно керованих параметрів.

Звідси випливає логіка вдосконалення: (1) застосування профілів із плавною зміною кривизни (обмеження $k(s)$ і мінімізація $|k'(s)|$ зменшує пікові $\varepsilon_{\max(s)}$ і $\sigma_{\max(s)}$ та підвищує стабільність формоутворення; (2) формування керованого зміцнювального мікрорельєфу стабілізує контактні умови, знижує просторові колювання $\mu(s)$, вирівнює $p(s)$ і пригнічує stick–slip; (3) стабілізація згину та тертя проявляється у зменшенні геометричних відхилень зведення Δx і $\Delta \varphi$ (через зниження їх дисперсій) та у зростанні ефективної площі клейового

контакту, що підвищує міцність з'єднання і знижує ризик розклеювання в експлуатації [42].

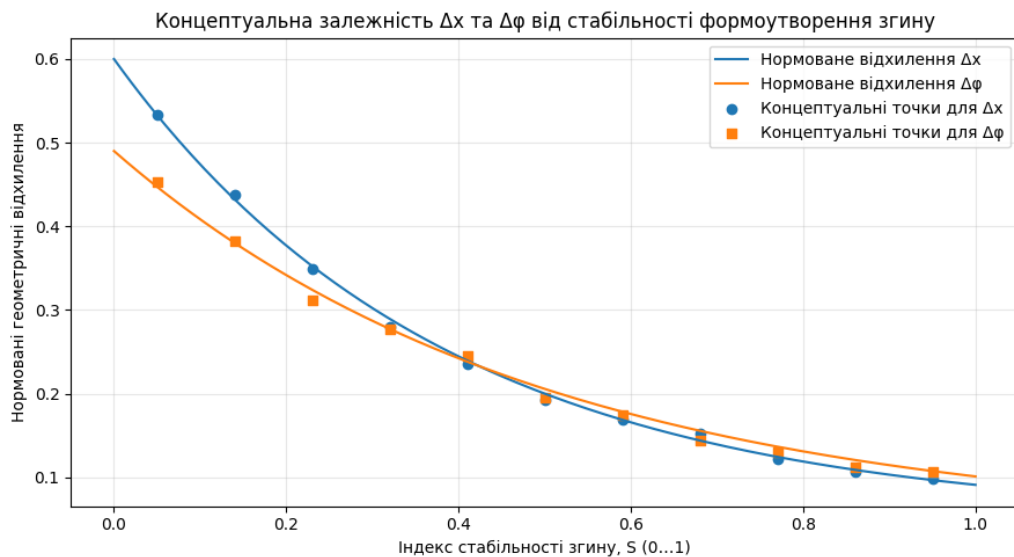


Рис. 2.1.6. Концептуальна залежність геометричних відхилень зведення Δx та $\Delta \varphi$ від індексу стабільності згину S : S – нормований показник стабільності формоутворення (0...1), Δx – лінійне відхилення зведення, $\Delta \varphi$ – кутове відхилення; криві подано у нормованому вигляді [42].

У підсумку поєднання методики раціонального вибору профілю фальцювальних планок і технології поверхневого зміцнення їх робочих поверхонь мікрорельєфними напрямними створює науково обґрунтовану основу для цілеспрямованого керування процесами фальцювання та приклеювання інтегральних обкладинок і забезпечує зменшення візуальних та експлуатаційних дефектів у серійному виробництві.

Примітка: наведені залежності та розподіли параметрів подано у межах концептуальної (критеріальної) моделі й використовуються для обґрунтування напрямів удосконалення профілю та поверхневого стану фальцювальних планок.

Наведений аналіз контактнo-механічних передумов дефектоутворення дозволяє розглядати процес фальцювання інтегральних обкладинок як керовану систему, в якій геометрія профілю фальцювальних планок, умови

контактної взаємодії та режими деформування безпосередньо формують показники якості формоутворення і приклеювання.

2.2. Динамічні зусилля, тертя та умови транспортування розгортки у фальцювальних-склеювальних системах

Ефективність процесу фальцювання інтегральних обкладинок визначається не лише якістю адгезивів та способами їх нанесення, а й динамікою транспортування матеріалу фальцювальною секцією обладнання.

Проведений у підрозділі 1.3 аналіз фізико-механічних властивостей адгезивів та особливостей їх взаємодії з картоном сформував основу для розуміння локальних процесів у зоні фальца. Однак реальні умови формування інтегральної обкладинки визначаються не лише властивостями матеріалів, а й динамікою їх переміщення у фальцювальній системі.

Саме транспортувальний механізм задає розподіл зусиль, форму контактної взаємодії та швидкісний режим, у якому реалізуються деформаційні й трибологічні процеси.

Тому подальший аналіз потребує переходу від локальних моделей матеріалів до вивчення кінематичних, силових і трибологічних параметрів транспортування, які визначають стабільність формування фальца та інтенсивність зношування робочих поверхонь інструментів.

На цьому етапі картонні розгортки проходять через систему притискних валків, напрямних та фальцювальних планок, взаємодіючи зі стрічками транспортування та робочими поверхнями профільних елементів.

Швидкість транспортування розгортки визначається базовим кінематичним співвідношенням:

$$v = \frac{L}{t}, \quad (2.2.1)$$

де v – швидкість руху розгортки; L – довжина ділянки транспортування; t – час її проходження.

Це рівняння задає тривалість взаємодії картону з валками, транспортувальними стрічками та фальцювальною планкою, визначаючи умови розвитку тертя, локальних деформацій і динамічних навантажень у зоні фальцювання. Ці взаємодії формують складний напружено-деформований стан, від якого залежить стабільність операції фальцювання, рівномірність руху й інтенсивність зношування фальцювальних планок.

У цьому підрозділі виконано системний аналіз контактних умов, динамічних зусиль та впливу тертя на якість процесу.

2.2.1. Конструктивні та кінематичні особливості транспортувальної системи

Транспортувальні системи фальцювально-склеювальних машин забезпечують стабільне та контрольоване переміщення розгортки інтегральних обкладинок через зони згину та приклеювання. Саме на цьому етапі формуються вихідні умови для точності фальцювання, стабільності утворюваного фальца та мінімізації дефектів. Тому кінематичні та конструктивні властивості транспортувального модуля безпосередньо впливають на якість готової обкладинки.

У типовій фальцювально-склеювальній машині транспортувальна система складається з таких модулів [32]:

- верхні та нижні транспортувальні стрічки (belt conveyors) – створюють стабільний транспортний зазор та передають тангенціальну силу переміщення;
- притискні валки – стабілізують траєкторію руху та забезпечують нормальний притиск;
- профільні фальцювальні планки – формують і стабілізують згин під час проходження картону;
- направляючі пластини – обмежують ступінь поперечного зміщення розгортки.

Стрічки виконані з багатошарових полімерних матеріалів HABASIT із мікрорельєсною поверхнею, що забезпечує необхідний коефіцієнт тертя μ . Це важливий параметр, оскільки недостатнє тертя спричиняє ковзання, а надмірне – хвилястість або локальне зминання картону (табл. 2.2.1).

Таблиця 2.2.1.

Типові конструктивні параметри стрічкової системи

№	Параметр	Значення
1	Товщина стрічки	1.8–3.2 мм
2	Коефіцієнт тертя по картону (μ)	0.35–0.55
3	Швидкість транспортування (v)	0.8–2.5 м/с
4	Тиск притискних валків (N)	50–150 Н

Узагальнена просторова компоновка перелічених елементів показує, яким чином формуються транспортний зазор, зона притиску та траєкторія руху розгортки інтегральної обкладинки в машині. Взаємне розташування верхніх і нижніх стрічок, притискних валків, профільних фальцювальних планок і направляючих пластин визначає умови фіксації обкладинки та передачі їй руху в напрямку фальцювання і приклеювання. Кінематичну схему такої транспортувальної системи подано на рис. 2.2.1 [32].

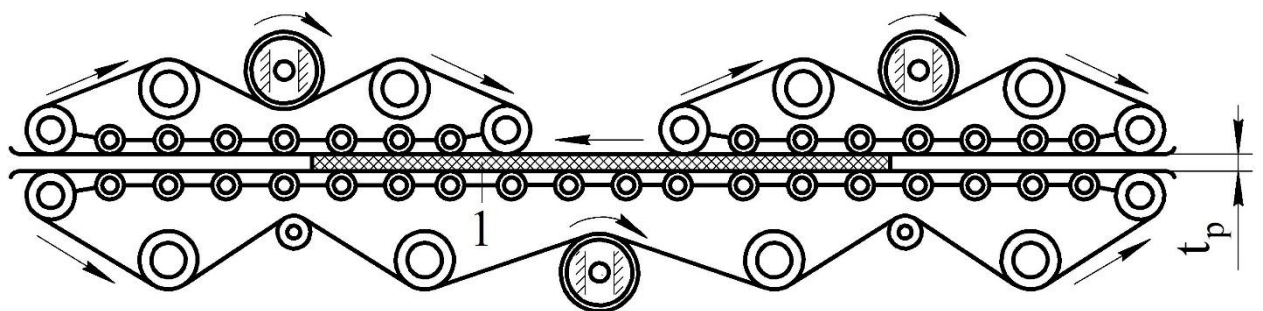


Рис. 2.2.1. Кінематична схема транспортувального пристрою для розгортки інтегральних обкладинок: 1 – розгортка інтегральної обкладинки; t_p – регульований зазор за товщиною розгортки в зоні транспортування.

На рисунку подано кінематичну схему транспортувального пристрою фальцювально-склеювальної секції. Верхні та нижні безкінечні стрічки, що огинають систему напрямних роликів, утворюють транспортний канал, у якому затиснена розгортка інтегральної обкладинки 1. Стрілками показано напрям руху стрічок, який забезпечує стабільне протягування обкладинки крізь зону згину та приклеювання.

У центральній частині схеми штрихуванням виділено переріз розгортки обкладинки, а відстань між поверхнями, що притискають обкладинку, відповідає її товщині t_p . Регулювання зазору до значення t_p забезпечує необхідний притиск, рівномірне транспортування й запобігає зміщенню розгортки під час фальцювання.

У процесі транспортування в межах фальцювального вузла картон зазнає комбінованої дії механічних навантажень, сформованих взаємодією з елементами транспортно-напрямної системи, зокрема:

- нормальна сила притиску, N ;
- тангенціальна сила переміщення F_t ;
- контактний тиск фальцювальної планки $p(x)$;
- локальні сили деформації у зоні сегментів клею.

Тангенціальна сила, що забезпечує переміщення картону, дорівнює:

$$F_t = \mu \cdot N, \quad (2.2.2)$$

а умова відсутності ковзання визначається співвідношенням:

$$F_t \geq F_{\text{інерц}} = ma, \quad (2.2.3)$$

де m – маса фрагмента розгортки; a – прискорення при запуску/зупинці машини.

У зоні взаємодії з фальцювальною планкою контактний тиск може бути описано залежністю:

$$p(x) = \frac{N}{A_{\text{конт}}} + p_{\text{лок}}(x), \quad (2.2.4)$$

де $A_{\text{конт}}$ – площа контакту; $p_{\text{лок}}(x)$ – локальні піки тиску, зумовлені сегментами клею або дефектами мікрорельєфу.

Ці піки суттєво важливі, оскільки саме вони спричиняють більшість дефектів – біління, мікротріщини, розшарування.

1. Вплив кінематики на точність фальцювання.

Точність формування фальца визначається:

- *Стабільністю швидкості транспортування*

Коливання більше ніж $\pm 3\%$ викликають зміни: часу контакту з планкою, величини деформацій, симетрії фальца.

- *Похибками позиціювання розгортки*

Поперечне зміщення понад 0.3–0.5 мм призводить до: асиметрії клапанів, зміщення фальца, дефектів склеювання.

Кінематично це описується співвідношенням:

$$\Delta x = v \cdot \Delta t, \quad (2.2.5)$$

де похибки в часі введення клапана в зону згину перетворюються на зміщення.

2. Взаємодія сегментів клею з транспортувальною системою

Наявність сегментів клею створює локальні перепади жорсткості, які викликають нерівномірний контактний тиск із планкою. Математично локальне підвищення тиску можна оцінити:

$$p_{\text{лок}} = \frac{E_k h_k}{h_c}, \quad (2.2.6)$$

де E_k , h_k – модуль і товщина клейового сегмента; h_c – товщина картону.

Якщо $p_{\text{лок}}$ зростає вище допустимих значень, виникають небезпечні дефекти: зминання, тріщини, розшарування. Тому сегментне нанесення клею повинно розглядатися у взаємозв'язку з кінематикою транспортування:

- транспортувальна система визначає вихідні умови для точності фальцювання.

– параметри стрічок, валків та швидкості формують контактні сили й тиск на планку.

– локальні зміни жорсткості через сегменти клею істотно впливають на контактну взаємодію.

– аналітичні залежності $F_t = \mu N$, $p(x)$, $\Delta x = v\Delta t$ дають можливість формувати інженерні критерії оптимізації процесу.

2.2.2. Контактна взаємодія картону зі стрічками та фальцювальними планками

У процесі транспортування до фальцювальної зони картон взаємодіє з системою стрічок та напрямних елементів, що забезпечують стабільний рух розгортки обкладинки. Контактні сили, що виникають між картоном, транспортними стрічками і профільною фальцювальною планкою, визначають точність позиціонування та рівномірність деформацій у зоні фальца. Особливо важливим є врахування впливу сегментних або вибіркового клейових полів, які призводять до нерівномірних контактних напружень та локальних пікових зусиль.

1. Контакт картону зі стрічками транспортувального пристрою

Під час стабілізації переміщення картон затискається між верхньою та нижньою стрічками. Сила притиску визначається:

$$F_n = P \cdot A, \quad (2.2.7)$$

де P – питома сила пресування; A – площа контакту стрічки з картоном.

Цей притиск формує умови для виникнення сили тертя, яка забезпечує транспортування:

$$F_\tau = \mu F_n, \quad (2.2.8)$$

де μ – коефіцієнт тертя «стрічка–картон».

У реальних умовах μ змінюється залежно від:

– структури картону (пористість, гладкість),

- наявності сегментних шарів клею з внутрішньої сторони клапанів розгортки обкладинки,
- шорсткості транспортувальних стрічок,
- вологості та температури повітря.

Поява на клапанах локальних клейових сегментів з внутрішньої сторони клапанів розгортки обкладинки, протилежної контактній площині клапанів з фальцювальними планками, змінює μ на 10–25 %, що призводить до дрібних зміщень та коливань швидкості транспортування, які кумулятивно знижують точність фальцювання.

2.3. Зміна траєкторії та контакт із фальцювальною планкою

При вході картону в фальцювальний канал траєкторія руху змінюється. Це створює додаткову нормальну реакцію планки:

$$R_n = F_n \cdot \cos(\alpha), \quad (2.2.9)$$

де α – кут входу картону у фальцювальну зону.

У зоні згину сумарна дія сил задається рівнянням:

$$F_\Sigma = F_\tau + R_n + F_k, \quad (2.2.10)$$

де F_k – опір згину картону, який залежить від:

- багатошарової структури матеріалу,
- напрямку волокон,
- наявності клейового шару.

Уточнена модель F_k :

$$F_k = E_{ef} I k, \quad (2.2.11)$$

де E_{ef} – ефективний модуль згину картону з урахуванням клею; I – момент інерції перерізу (змінюється при сегментному нанесенні); k – кривина.

3. Вплив сегментного нанесення клею на контактні сили та тиск

Оскільки окремі сегменти нанесеного адгезиву розташовані на поверхні клапанів, протилежній зоні контакту з фальцювальними планками, і в цих

ділянках зумовлюють локальне підвищення жорсткості матеріалу на 10–25 %, під час їх проходження через зону фальцювання виникають:

- пікові значення контактного тиску,
- різке зростання опору згину,
- локальні деформації типу «вушка» або «біління»,
- мікророзгладжування поверхневого шару картону,
- збільшення коефіцієнта тертя.

Для прогнозування цих ефектів застосовується модифікована модель Герца:

$$p(x) = p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}, \quad (2.2.12)$$

де $p(x)$ – контактний тиск у точці x ; p_0 – максимальний тиск у центрі контакту; a – півширина контактної плями.

У разі сегментного нанесення:

$$p_0^{seg} > p_0^{base}, \quad (2.2.13)$$

що підтверджує збільшення локального навантаження під час проходження сегментів через зону фальца.

4.Трибологічні наслідки взаємодії

Результатом нерівномірних контактних сил є:

- мікророзшарування матеріалу у зонах підвищеного R_n ,
- локальні площини ковзання, створені сегментами клею,
- істотна зміна розподілу швидкостей ковзання,
- нерівномірність деформаційного поля у фальці,
- зниження довговічності планок через підвищений абразивний вплив клею.

Ці явища узгоджуються з аналізом, представленим у підрозділі 1.3, і демонструють важливість урахування реологічних та механічних параметрів адгезивного шару при моделюванні фальцювання.

Контактна взаємодія картону з транспортними стрічками та фальцювальними планками є одним із найважливіших процесів, що

визначають точність, стабільність і якість формування фальца. Застосування сегментних клейових структур суттєво змінює контактні параметри – від локального коефіцієнта тертя до розподілу тиску за Герцем [43] – і має бути обов’язково враховане у механічних моделях та конструктивних рішеннях фальцювальних систем.

2.2.3. Математична модель динамічних зусиль у транспортному вузлі

Ефективність роботи транспортного вузла фальцювальної секції визначається поєднанням сил тертя, нормального навантаження, опору згину картону та реакції фальцювальної планки. У реальних умовах виробництва ці параметри змінюються нерівномірно по довжині фальца, особливо за наявності клейових шарів або сегментів, які створюють складну картину локальної жорсткості та тертя. Саме тому побудова узагальненої математичної моделі динамічних зусиль [44] є необхідною для прогнозування дефектів (біління, розшарування, хвилястості) та оптимізації профілю планок.

1. Модель ефективного опору згину з урахуванням клейових сегментів

Поведінка картону у зоні фальца описується його ефективною згинальною жорсткістю EI_{eff} , яка залежить від того, чи нанесений клей суцільно, вибірково чи сегментно.

Для базового картону:

$$M = EI_0 k, \quad (2.2.14)$$

де M – згинальний момент; k – кривина; EI_0 – згинальна жорсткість картону.

При наявності клею реальна жорсткість збільшується:

$$EI_{ef} = EI_0 + EI_k, \quad (2.2.15)$$

де EI_k – додатковий внесок клейового шару.

Сегментне нанесення створює періодичні ділянки підвищеної жорсткості, що формує змінний опір згину.

Нехай α – частка довжини клапана без клею, $1 - \alpha$ – частка довжини зі сегментами клею.

Тоді:

$$EI_{eff, seg} = \alpha EI_0 + (1 - \alpha) EI_k. \quad (2.2.16)$$

Ця модель показує, що навіть невелика частка сегментів (наприклад, 20–30 %) здатна підвищити локальну жорсткість на 10–25 %, що суттєво впливає на формування фальца.

2. Модель сумарної сили у зоні контакту планки та картону

У точці взаємодії картонної заготовки розгортки обкладинки та профільної фальцювальної планки виникає сумарна сила, яка враховує:

- нормальне навантаження N ,
- тертя F_t ,
- реакцію планки R_p ,
- опір згину картону.

У загальному вигляді:

$$F_\Sigma = F_t + R_p + M', \quad (2.2.17)$$

де M' – приведена сила від опору згину M .

Сила тертя:

$$F_t = \mu N. \quad (2.2.18)$$

У практичних дослідженнях враховується додаткова складова тертя від сегментів клею:

$$F_t = (\mu + \mu_k) N, \quad (2.2.19)$$

де μ_k – інкремент коефіцієнта тертя, спричинений наявністю клею.

Технологічні значення при типовому діапазоні параметрів: $N = 50\text{--}150$, Н;
 $\mu = 0.35\text{--}0.55$, тоді фактичне навантаження:

$$F = \mu N = 17\text{--}82 \text{ Н}. \quad (2.2.20)$$

Технологічні значення показують, що при типовому діапазоні параметрів $N=50\text{--}150$ Н та $\mu=0.35\text{--}0.55$, фактичне навантаження на транспортувальні

елементи значно зростає, що безпосередньо впливає на стабільність руху картону та імовірність виникнення мікропошкоджень у зоні фальцювання. Для систематизації цих взаємозв'язків доцільно розглянути узагальнені дані щодо динамічних зусиль, які виникають у процесі транспортування картону під дією тиску, зчеплення та сегментних нерівностей клею (табл. 2.2.2).

Таблиця 2.2.2.

Динамічні зусилля при транспортуванні картону

Тип картону	Товщина, мм	μ	N, Н	$F = \mu \cdot N$, Н
Хром-ерзац	0.40	0.40	70	28.0
Хром-ерзац	0.60	0.42	80	33.6
Картон інтегральної обкладинки	1.20	0.48	120	57.6
Картон інтегральної обкладинки	1.40	0.50	140	70.0
Картон з клеєм (сегментне нанесення)	1.60	0.55	150	82.5

З даних видно, що наявність клейового шару не лише збільшує товщину та жорсткість картону, але й суттєво підвищує коефіцієнт тертя, збільшуючи динамічне навантаження до 40–60 %. Це створює підвищені контактні напруження, які прискорюють зношування планок і сприяють появі дефектів. Саме тому розроблення технологій зміцнення поверхні планок є технічно обґрунтованим.

2.2.4. Вплив динамічних зусиль на знос фальцювальних планок

Контакт картону з фальцювальною планкою супроводжується складним поєднанням механічних впливів, що мають кумулятивний ефект зношування. Особливо відповідальною є ситуація, коли клей нанесено сегментно – у цьому випадку динамічні навантаження мають пульсівний характер.

Основними факторами, що формують інтенсивність зношування, є:

1. Пікові ударні навантаження при проходженні сегментів клею (зростання N до 1.2–1.4 разів).
2. Неоднорідний коефіцієнт тертя, який змінюється в межах 0.35–0.55.
3. Абразивні домішки – паперовий пил, частинки оздоблювальних шарів.

4. Низька твердість та мікронерівності планки, що призводять до мікроскопічних виривань матеріалу.

5. Комбінований механізм зношування: фретинг, адгезійне та абразивне тертя.

Результати світових досліджень, присвячених текстуруванню поверхонь штампів, інструментів для листової штамповки та роликів, свідчать про ефективність застосування мікрорельєфних напрямних, які:

- зменшують реальну площу контакту між інструментом і деформованим матеріалом; стабілізують тертя через формування мікропасток для продуктів зношування,

- розподіляють тиск уздовж робочої кромки,
- зменшують пікові сили при згині,
- знижують температуру тертя на 8–15 %,
- збільшують ресурс планок у 1.7–3.2 рази.

Зростання жорсткості картону, наявність клею та динамічні коливання навантажень формують підвищені вимоги до параметрів поверхні фальцювальних планок.

Саме тому подальші розділи дисертації будуть сфокусовані на:

- моделюванні мікрорельєфу;
- експериментальному вимірюванню зносостійкості;
- обґрунтуванні технології формування зміцнювальних напрямних;
- оптимізації профілю планок для роботи з інтегральними обкладинками.

Це забезпечить перехід від аналітичного моделювання до практичної технології підвищення довговічності фальцювальних систем.

2.3. Просторове формоутворення фальца та адгезивне склеювання інтегральних обкладинок

2.3.1. Оптимізація просторового формоутворення фальца та сегментного нанесення адгезиву для підвищення міцності інтегральних обкладинок

Стабільність формування фальца інтегральних обкладинок визначається поєднанням силових, геометричних і реологічних чинників, що одночасно діють під час згинання клапанів і їх подальшого приклеювання.

На цю стадію впливають властивості картону, параметри контактної взаємодії з профільною планкою, структура нанесення адгезиву та динаміка транспортування. Саме інтегральний характер цих процесів обумовлює формування реальної закладної кривини фальца, зон максимальних деформацій та умов, у яких може виникати локальне розшарування чи біління матеріалу. У цьому підрозділі систематизовано й узгоджено фізико-механічні закономірності, що визначають остаточну геометрію фальца та міцність клейового з'єднання. На основі виробничих спостережень та експериментальних даних проаналізовано вплив траєкторії згину, конфігурації притиску та сегментного нанесення адгезиву на характер напружено-деформованого стану картону [21].

Для наочності використано апаратні схеми (рис. 2.3.1, 2.3.2), що демонструють просторову конфігурацію згину клапанів інтегральних обкладинок, особливості контакту з профільними елементами та механізми формування дефектів [21].

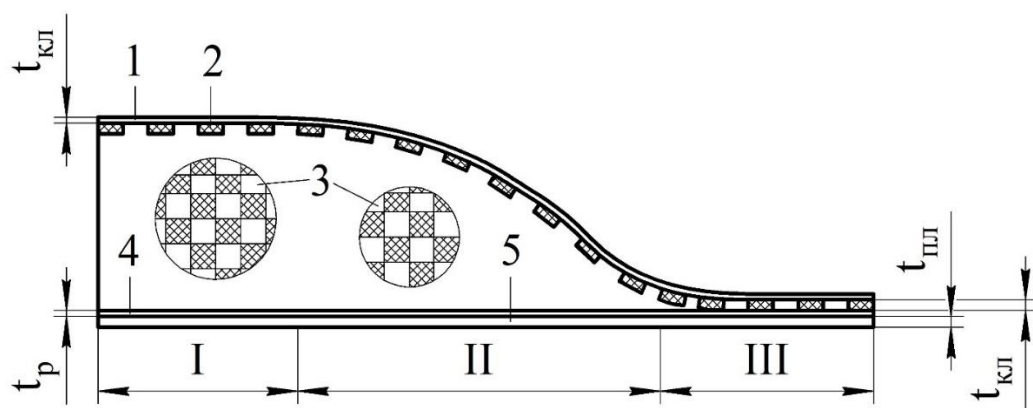


Рис. 2.3.1. Схема процесу фальцювання та адгезивного склеювання інтегральної обкладинки (I – початкове позиціонування клапанів; II – згинання клапанів фальцювальними планками; III – формування фальца та фінальне склеювання); 1 – клапан; 2 – клейовий сегмент; 3 – зони

сегментного нанесення клею; 4 – основа розгортки обкладинки; 5 – плоский фрагмент фальцювальної планки; t_p – товщина матеріалу розгортки; $t_{кл}$ – товщина клапана; $t_{кл}$ – товщина сегментного шару клею; $t_{пл}$ – товщина фальцювальної планки [21]

Представлена схема демонструє структуру основних етапів, у межах яких реалізується комбінована дія згинальних моментів, локального стискання картону та взаємодії клейових сегментів із робочими поверхнями фальцювальних планок [21].

На I етапі забезпечується початкове вирівнювання розгортки; на II етапі відбувається концентрований перенос навантаження на профільну планку; III етап пов'язаний із утворенням стійкої геометрії фальца; IV етап забезпечує остаточне адгезивне з'єднання клапана з основою обкладинки [21].

Аналіз показує, що геометрія фальца є результатом не лише згину картону, а й перерозподілу жорсткості, зумовленої наявністю клею та локальними зонами притискання [21].

Особливо показовим у цьому контексті є характер руйнування зовнішнього шару картону, який виникає за умов надмірних розтягувальних деформацій [21].

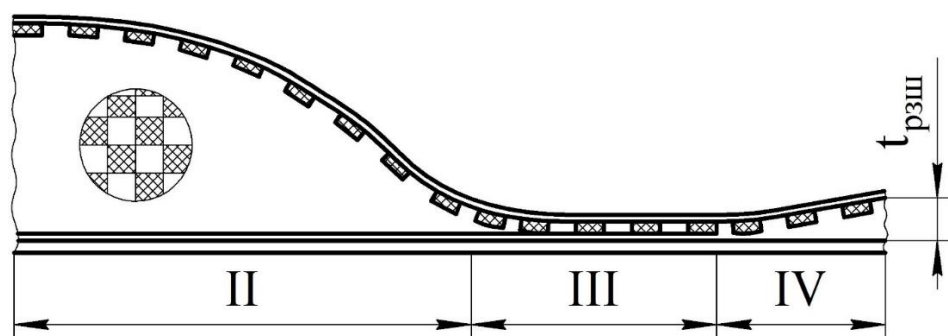


Рис. 2.3.2. Модель процесу відокремлення фрагмента клапана від основної частини інтегральної обкладинки: II – зона згину клапана; III – область локального притискового навантаження; IV – зона розвитку деламінації клейового з'єднання; $t_{рзш}$ – кількісна характеристика протяжності розшарування [21]

Зображений механізм розтягування вказує, що надмірний приріст відносної деформації ε у зовнішньому шарі картону під час згину може перевищувати поріг міцності волокнистої основи, що спричинює розшарування, або локальним тріщинам. Це створює необхідність точного моделювання кривини фальцювальної траєкторії та вибору такого профілю планки, який мінімізує критичні деформації.

2.4. Функціональні, конструктивні та матеріалознавчі параметри профільних фальцювальних планок і чинники їх зношування

2.4.1. Функціональна роль профільних фальцювальних планок у формуванні інтегральних обкладинок.

У сучасних фальцювально-склеювальних лініях профільні фальцювальні планки є інструментальною основою, що забезпечує точне формування інтегральних обкладинок. Вони мають задані профільні криволінійні краї та оптимальні кути нахилу, завдяки чому забезпечується якісне й відтворюване згинання конструктивних елементів обкладинок із щільного паперу та тонкого картону під час проходження розгортки через виконавчі механізми високошвидкісних ліній. Це дає змогу швидко й стабільно формувати згини на палітурних матеріалах, підвищуючи продуктивність і технологічну надійність процесу фальцювання та забезпечуючи однорідну якість книжково-журнальних напівфабрикатів, зокрема інтегральних обкладинок.

1. Вимоги до геометрії, адаптивності та матеріалів фальцювальних планок.

Профільні планки мають забезпечувати точне й рівномірне згинання матеріалів різної товщини та жорсткості – від тонкого паперу до хром-ерзац-картону. Умови масового виробництва обумовлюють жорсткі вимоги до геометричної точності: навіть незначні відхилення параметрів згину можуть призвести до дефектів обкладинок (перекоси, нерівномірні фальци, порушення суміщення з блоком). Тому конструкторська розробка планок має враховувати специфічні властивості використовуваних паперів і картонів, а

також формати та конструктивні особливості обкладинок. Адаптація профілю до конкретних матеріалів і режимів фальцювання підвищує універсальність застосування планок, мінімізує відходи, забезпечує ефективне використання сировини та сприяє зниженню собівартості за умови збереження стабільно високої якості продукції.

На рисунку 2.4.1 наведено фальцювальні планки фальцапарату, виготовлені зі сталі 05кп (ДСТУ ГОСТ 1050:2005), що за хімічним складом і властивостями відповідає сталі AISI 1005 (C05E) (поз. 1-3) та виготовлені зі сталі 08X18H10Б (ДСТУ ГОСТ 5632:2015), що за хімічним складом і властивостями відповідає сталі AISI 347 (EN 1.4550) (поз. 4), після експлуатації в умовах багаторазового контактного навантаження з паперово-картонними розгортками інтегральних обкладинок.

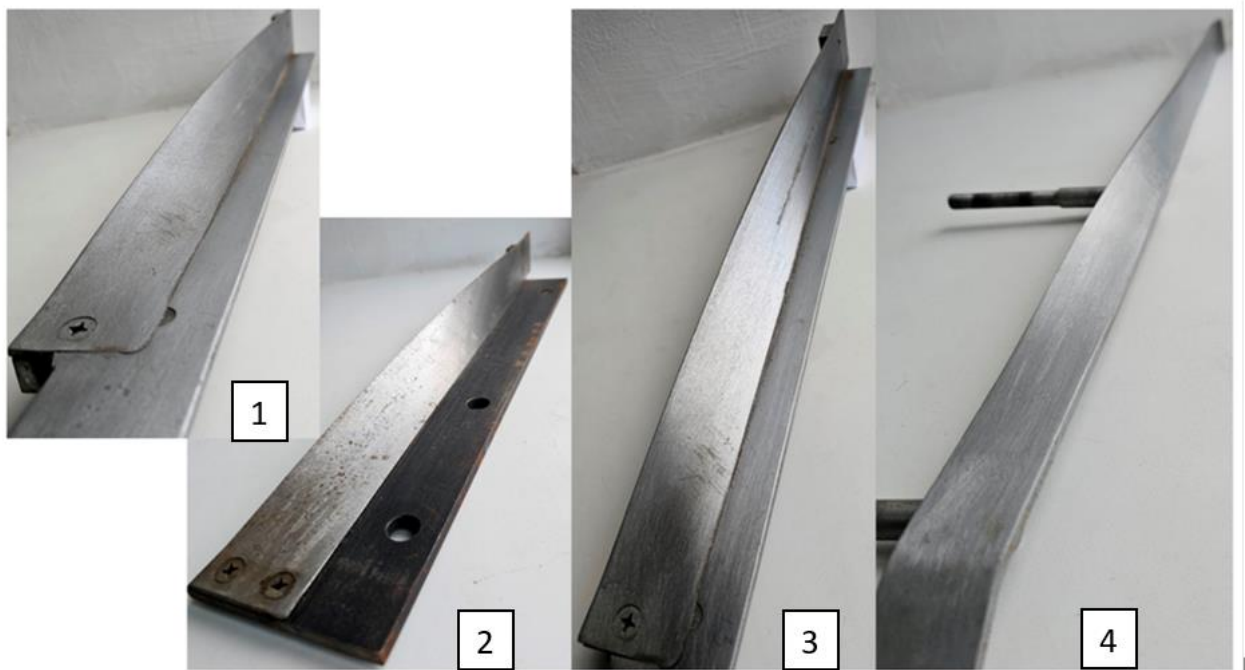


Рис. 2.4.1. Фальцювальні планки механізму фальцювання та склеювання інтегральних обкладинок: загальний вигляд і сліди зносу робочої поверхні: 1-3 – конструкційна сталь 05кп (AISI 1005/ EN C05E), 4 – корозійностійка сталь 08X18H10Б (AISI 347/ EN 1.4550)

Візуальний аналіз робочих поверхонь планок свідчить про наявність характерних слідів експлуатаційного зносу у вигляді поздовжніх подряпин, потертостей і локальних зон матування, орієнтованих переважно вздовж

напрямку відносного переміщення матеріалу. Утворення подряпин і мікронерівностей призводить до збільшення реальної площі контакту та зростання коефіцієнта тертя, що негативно впливає на стабільність руху заготовок у фальцювальному вузлі.

Зразки 1–3, виготовлені з конструкційної сталі 05кп, демонструють інтенсивний абразивно-контактний знос у вигляді згладжування профілю, притуплення крайок і локальних деформацій, що зумовлює зниження точності фальцювання та геометричної стабільності обкладинок.

Зразок 4 із корозійностійкої сталі 08Х18Н10Б характеризується більш рівномірним зносом і меншою схильністю до деформацій, однак і для нього при тривалій експлуатації спостерігається поступова втрата геометрії профілю, що підтверджує доцільність застосування додаткових методів зміцнення робочих поверхонь.

Нерівномірність розподілу слідів зносу по довжині планок обох марок сталі вказує на локальні зони підвищеного тертя та змінний характер контактних навантажень, зокрема в ділянках формування лінії фальца. За таких умов пріоритетним фактором опору переміщенню заготовки в контакті “планка – клапан” є сукупна дія коефіцієнта тертя та нормальної реакції притискання, величина якої визначається кінематикою вузла і жорсткісними характеристиками деформованої розгортки обкладинки.

У даному технологічному випадку клей наноситься на сторону клапана, протилежну тій, що контактує з фальцювальною планкою; відповідно, безпосередній контакт клею з поверхнею планки відсутній, і зміна коефіцієнта тертя в зоні контакту «планка – клапан» як наслідок клейового шару не розглядається. Водночас наявність клейового шару на звороті клапана може впливати на силові параметри фальцювання за рахунок зміни згинальної жорсткості та в'язкопружного опору деформації, що призводить до зміни нормальної реакції притискання клапана до планки. Для сухого контакту сила тертя визначається співвідношенням

$$F_t = \mu_{dry} N, \quad (2.4.1)$$

де F_t – сила тертя в контактi «планка – суха сторона клапана», μ_{dry} – коефіцієнт тертя для сухого контакту, N – нормальна сила притискання. Вплив наявності клею на звороті клапана доцільно описувати через приріст нормальної сили

$$\Delta N_{\text{клей}} = N_{(\text{з клеєм})} - N_{(\text{без клею})}, \quad (2.4.2)$$

який обумовлює відповідний приріст сили тертя

$$\Delta F_{t,\text{клей}} = \mu_{dry} \Delta N_{\text{клей}}. \quad (2.4.3)$$

Таким чином, можливе зростання опору переміщенню заготовки при наявності клею пояснюється не зміною μ у зоні контакту з планкою, а зміною контактних реакцій (насамперед N) та додатковими енергетичними витратами на деформування клапана, що в сукупності впливає на стабільність руху розгортки та інтенсивність зношування робочої поверхні фальцювальних планок.

Використання зносостійких матеріалів у поєднанні з технологіями поверхневого зміцнення, зокрема формуванням мікрорельєфних напрямних, дає змогу істотно підвищити довговічність планок і зменшити ризик пошкодження обкладинок у процесі фальцювання.

Такий підхід скорочує частоту заміни інструмента, зменшує прості обладнання та експлуатаційні витрати, а також позитивно впливає на екологічні показники виробництва за рахунок зниження обсягів відходів і споживання ресурсів. Важливою є також взаємодія планок із клейовими системами. Використання матеріалів із низькою адгезією та модифікованих поверхневих шарів зменшує налипання клейових залишків і обкладинок на пластини, що запобігає утворенню поверхневих дефектів, зменшує потребу в зупинках для очищення й забезпечує стабільність якості фальцювання впродовж усього тиражу.

2.Інтеграція профільних планок у керовані й автоматизовані фальцювальні системи.

Профільні фальцювальні планки, конструктивно пристосовані до формування різних типів згинів, створюють передумови для реалізації складних дизайнерських рішень інтегральних обкладинок. Їх можливість переналаштування (програмного чи механічного) забезпечує гнучкість виробництва під час переходу між накладами з різними форматами й конструкціями, скорочуючи час переналагодження та втрати продукції.

Інтеграція планок в автоматизовані системи контролю якості дозволяє реалізувати безперервний моніторинг точності згинів і відповідності геометричних параметрів заданим допускам. Оптичні сенсори та спеціалізоване програмне забезпечення для аналізу геометрії фальців забезпечують своєчасне виявлення відхилень, підвищують надійність роботи лінії та гарантують стабільний рівень якості інтегральних обкладинок відповідно до вимог ринку.

3. Технологія формування зміцнювального мікрорельєфу на робочих поверхнях планок.

Перспективним напрямом удосконалення деталей фальцювальних механізмів є поверхневе зміцнення профільних фальцювальних планок на основі локальної пластичної деформації з формуванням мікрорельєфних напрямних функціонально орієнтованих мікрогеометричних елементів, сформованих на робочій поверхні фальцювальних планок у вигляді впорядкованих заглиблень або виступів з керованою орієнтацією, кроком та профілем, призначені для одночасного зміцнення поверхні та активного керування рухом заготовки в зоні фальцювання [56].

На відміну від ізотропного мікрорельєфу, мікрорельєфні напрямні мають анізотропну структуру, що забезпечує різні значення коефіцієнта тертя у поздовжньому та поперечному напрямках. Така особливість дозволяє створювати спрямовану взаємодію між робочою поверхнею планки та матеріалом інтегральної обкладинки, стабілізуючи її траєкторію руху та зменшуючи ймовірність бокового зсуву [56].

З трибологічної точки зору мікрорельєфні напрямні сприяють локалізації контактних напружень у приповерхневому шарі, зменшенню реальної площі контакту та формуванню сприятливих умов ковзання. Водночас орієнтована геометрія напрямних забезпечує ефект «самоцентрування» заготовки, особливо при використанні симетричних або ялинкоподібних профілів [56].

З технологічної позиції мікрорельєфні напрямні можуть реалізовуватися у вигляді паралельних, кутових або шевронних структур, параметри яких (глибина, ширина, кут нахилу, крок) підбираються залежно від типу матеріалу обкладинки, швидкості фальцювання та вимог до точності формування фальця. Формування таких структур можливе як механічними (індентація, накатка), так і фізичними методами (лазерна мікрообробка) [56].

Функціонально мікрорельєфні напрямні виконують подвійну роль: з одного боку, підвищують зносостійкість робочої поверхні фальцювальних планок за рахунок зміцнення приповерхневого шару, а з іншого – забезпечують керовану стабілізацію положення заготовки, що безпосередньо впливає на точність, повторюваність і якість процесу фальцювання інтегральних обкладинок (табл. 2.4.1) [56].

Таблиця 2.4.1.

Основні відмінності між мікрорельєфом і мікрорельєфними напрямними робочої поверхні фальцювальних планок

Критерій	Мікрорельєф	Мікрорельєфні напрямні
Орієнтація елементів	Відсутня (ізотропна)	Задана, керована
Основна функція	Зміцнення	Зміцнення + напрямна дія
Вплив на рух заготовки	Пасивний	Активний
Контроль траєкторії	Немає	Є
Точність фальцювання	Побічно підвищується	Цілеспрямовано забезпечується
Придатність для інтегральних обкладинок	Обмежена	Висока

Нанесення мікрорельєфу на поверхні профільних пластин (рис. 2.4.2) підвищує їх зносостійкість і стійкість до локальних контактних навантажень у зоні фальцювання, забезпечуючи тривалий ресурс роботи та стабільну якість оброблюваних матеріалів протягом великих тиражів [56].

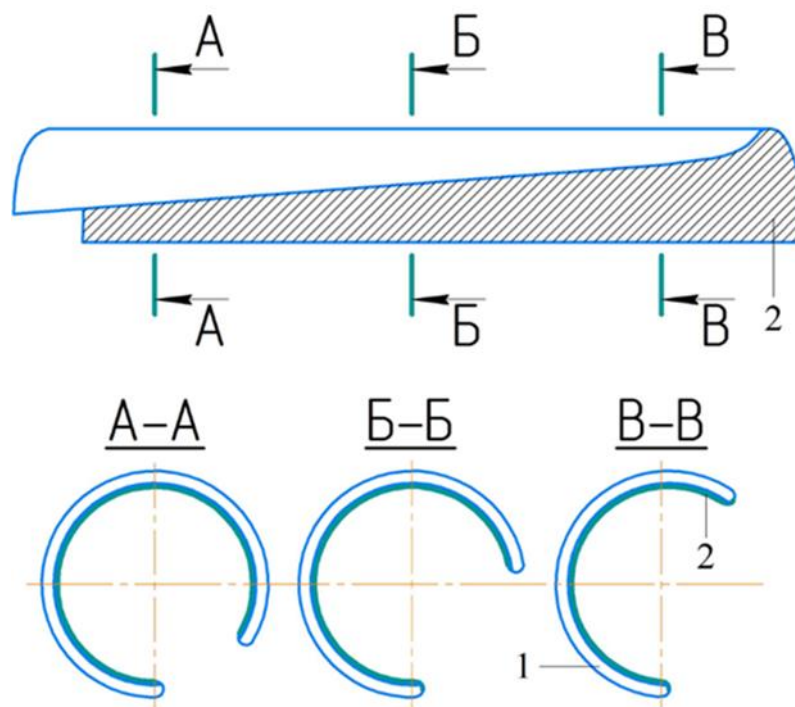


Рис. 2.4.2. Фальцювальна планка зі змінним лінійним профілем:

1 – профільна планка; 2 – мікрорельєф на робочій поверхні планки;

A–A, Б–Б, В–В – перерізи (збільшено) змінних профільних ділянок [56]

Формування мікрорельєфу здійснюється без додаткового термічного впливу завдяки застосуванню спеціального прес-інструмента, робоча поверхня якого має профіль, що відтворює конфігурацію заглиблення мікрорельєфу [56].

У процесі деформування метал поверхневого шару локально ущільнюється вглиб масиву деталі, що приводить до підвищення щільності та міцності поверхні. Залишкові пластичні деформації не погіршують якість робочого шару, навпаки – формують регулярний і рівномірний мікрорельєф, який покращує фізико-механічні характеристики планок, їхню зносостійкість і стійкість до дії циклічних навантажень [56].

Застосування технологій поверхневого пластичного деформування для зміцнення фальцювальних планок сприяє не лише підвищенню точності виготовлення й довговічності деталей, але й зменшенню обсягів виробничих відходів, що відповідає принципам ресурсоощадного та сталого розвитку. Зниження потреби в частих ремонтах і заміні планок зменшує споживання матеріальних і енергетичних ресурсів, скорочує простої обладнання та підвищує загальну ефективність фальцювально-склеювальних ліній [56].

Отже, профільні фальцювальні планки є пріоритетним елементом фальцапарату, від якого залежить не лише геометрична точність формування інтегральної обкладинки, а й стабільність якості видання впродовж тиражу. Забезпечення їхньої працездатності й своєчасне відновлення робочих поверхонь безпосередньо впливають на обсяги браку та кількість відходів, пов'язаних із заміною зношених деталей. Використання раціональних матеріалів і технологій зміцнення дає змогу зменшити частоту планових простоїв, скоротити споживання металу та енергоресурсів на виготовлення нових планок, що в кінцевому підсумку сприяє підвищенню екологічної та ресурсоощадної ефективності поліграфічного виробництва.

2.4.2. Сучасні методи моделювання та вдосконалення мікрорельєфу робочих поверхонь деталей фальцювальних механізмів

Розвиток методів поверхневого зміцнення та моделювання мікрорельєфу суттєво розширив можливості керування експлуатаційними властивостями деталей машин. Для фальцювальних механізмів, що працюють за умов циклічного навантаження та ковзного тертя, ключовим є формування керованого мікрорельєфу, здатного знижувати тертя, підвищувати зносостійкість і стабілізувати процес фальцювання, завдяки цілеспрямованій модифікації приповерхневого шару.

У працях [44–47, 56] розглянуто механічні способи створення регулярних або частково регулярних мікроструктур (зокрема вібраційна обробка та контактна деформація з формуванням комірчастих структур і V-подібних

каналок). Показано, що керування геометрією заглибин і кроком структур може суттєво зменшувати коефіцієнт тертя, однак більшість підходів орієнтовано на циліндричні поверхні та не враховує специфіку плоских профільних пластин фальцювальних механізмів. Окремо відзначено роботи [46, 47, 56], де встановлено визначальну роль кінематики обробки (частота, амплітуда, характер траєкторії) у формуванні структури та регулярності мікрорельєфу, тоді як силові параметри мають вторинний вплив. Водночас питання використання цих закономірностей для створення спрямованих мікрорельєфних напрямних, узгоджених із траєкторією руху заготовки у фальцюванні, залишається недостатньо висвітленим. У дослідженнях [48, 49, 56] наведено комбіновані механічні схеми (пластичне деформування + абразивне доведення), які для аустенітних сталей забезпечують покращення шорсткості, зростання твердості та формування зміцненого шару із залишковими напруженнями стискання; запропоновано також імітаційні моделі формування мікрорельєфу, проте без орієнтації напрямних відповідно до технологічного руху матеріалу. Подальший розвиток моделювання пов'язують зі спеціальними методами та нейромережевими алгоритмами [51, 56], однак їх адаптація до деталей зі складною профільною геометрією залишається відкритою. Для підвищення властивостей приповерхневого шару після формування мікрорельєфу застосовують і хіміко-термічні процеси (зокрема іонне азотування) [52, 56], але переважно для осесиметричних деталей.

Загалом сучасні технології формування й моделювання мікрорельєфу забезпечують ефективне підвищення зносостійкості та керування тертям, проте більшість результатів стосується циліндричних поверхонь і відносно простої геометрії. Специфіка плоских профільних планок фальцювальних механізмів, що контактують із розгортками інтегральних обкладинок і потребують формування спрямованих напрямних уздовж шляху руху заготовки, досліджена недостатньо, що обумовлює необхідність розроблення

відповідних моделей, визначення оптимальних параметрів мікрорельєфу та оцінювання їх впливу на процес фальцювання.

2.4.3. Аналіз зносостійкості фальцювальних планок з корозійностійкої сталі: вплив матеріалу та технологічних факторів

У сучасній поліграфічній індустрії забезпечення стабільної якості продукції та високої ефективності виробництва безпосередньо пов'язане з довговічністю й надійністю деталей обладнання. Для поточкових швидкісних ліній, що виготовляють інтегральні обкладинки, особливо важливою складовою фальцювально-склеювального механізму є профільні фальцювальні планки, які працюють у режимі інтенсивних циклічних навантажень та ковзного тертя під час фальцювання розгорток. Їхній знос визначає зміни геометрії профілю, появу локальних заглибин і дефектів поверхні, що в підсумку призводить до порушення точності фальцювання, дефектів обкладинок і вимушених зупинок лінії для регулювання чи заміни пластин [56].

З огляду на наявність у фальцювальному вузлі вологи, клейових відкладень і продуктів очищення, матеріал фальцювальних планок має забезпечувати не лише міцність і пластичність, а й стабільність трибологічних властивостей робочої поверхні протягом ресурсу. У подальшому аналізі розглянуто групу корозійностійких сталей як базові матеріали для планок у типових умовах виготовлення інтегральних обкладинок. Узагальнені відповідності марок сталей та вміст основних легувальних елементів за українськими й міжнародними стандартами наведено в табл. 2.4.2 [56].

Таблиця 2.4.2.

Узгодження маркування корозійностійких сталей за українськими та міжнародними нормативними системами з аналізом їх хімічного складу

ДСТУ	EN (DIN)	AISI	Cr, %	C, %	Mn, %	Ni, %	Mo, %	Nb (Ti), %
20X13	1.4021	420	12–14	≤0,20	≤1,5	–	–	–

30X13	1.4016	430	16–18	$\leq 0,08$	$\leq 1,0$	–	–	–
12X18H10	1.4305	303	16–19	$\leq 0,12$	$\leq 6,5$	5–10	–	–
08X18H10	1.4301	304	18–19	$\leq 0,07$	$\leq 2,0$	8– 10,5	–	–
03X18H11	1.4306	304L	18–20	$\leq 0,03$	$\leq 2,0$	10– 12	–	–
08X18H12T	1.4541	321	17–19	$\leq 0,08$	$\leq 2,0$	9–12	–	Ti
08X17H14M2	1.4401	316	16–18	$\leq 0,08$	$\leq 2,0$	10– 14	2,0– 2,5	–
03X17H14M3	1.4404	316L	17–19	$\leq 0,03$	$\leq 2,0$	10– 14	2,0– 3,0	–
08X17H15M3T	1.4571	316Ti	16–18	$\leq 0,08$	$\leq 2,0$	11– 12,5	2,0– 3,0	Ti
08X18H10Б	1.4550	347	17–19	$\leq 0,08$	$\leq 2,0$	9–13	–	Nb 0,2– 1,0

Примітка. DIN – Deutsche Industrie Norm (Німеччина), AISI – American Iron and Steel Institute (США). Вміст хімічних елементів наведено у масових відсотках за стандартами ДСТУ, EN та AISI; відповідності є узагальненими і можуть незначно відрізнятися залежно від редакції стандарту та умов постачання.

На основі узагальнених даних табл. 2.4.2 сформовано вибірку матеріалів для подальшого аналізу контактної-механічної та трибологічної поведінки фальцювальних планок у процесі формоутворення інтегральних обкладинок. Критеріями відбору були: корозійна стійкість у присутності водорозчинних адгезивів, стабільність механічних властивостей при циклічних навантаженнях, здатність поверхні зберігати керовану мікрогеометрію та технологічність виготовлення/відновлення в умовах експлуатації [56].

Як основний матеріал планок розглядається 08X18H10Б (AISI 347, EN 1.4550), що поєднує корозійну стійкість і технологічну придатність до формування зміцнювального мікрорельєфу без втрати цілісності поверхневого шару [56].

Водночас 08X18H10 (AISI 304, EN 1.4301) використовується як базовий матеріал для порівняння впливу стабілізації та легування на контактну взаємодію [56].

Окремо до вибірки включено низьковуглецеві конструкційні сталі (05кп, 10, 20), оскільки в практиці вони можуть застосовуватися як економічний матеріал змінних планок за умови регламентованого сервісу (очищення від клею, контроль корозійних проявів, періодичне відновлення поверхні) (табл. 2.4.3).

Це дозволяє оцінити роль твердості та зносостійкості матеріалу планки в умовах фальцювання, а також встановити межі доцільності застосування бюджетних матеріалів без погіршення повторюваності геометричної якості обкладинок.

Відповідно до зазначених критеріїв корозійностійкі сталі розглядаються як матеріали, що забезпечують стабільність поверхні у вологих і клейових середовищах, тоді як низьковуглецеві сталі включено як економічну та технологічно ремонтпридатну альтернативу для оцінки меж доцільності їх застосування.

Таблиця 2.4.3.

Вибірка корозійностійких і низьковуглецевих конструкційних сталей для виготовлення фальцювальних планок

(ДСТУ/ГОСТ)	Коротка характеристика та обґрунтування застосування
08X18H10Б	Аустенітна корозійностійка сталь, стабілізована ніобієм; характеризується високою пластичністю, стабільністю механічних властивостей та підвищеною зносостійкістю при терті ковзання; доцільна для фальцювальних планок, що працюють у вологих і клейових середовищах та за підвищених вимог до стабільності мікрогеометрії.
08X18H10	Аустенітна корозійностійка нестабілізована сталь; використовується як базовий матеріал для порівняльного аналізу впливу легування та мікрорельєфу робочої поверхні на контактну взаємодію і знос у процесі фальцювання.
05кп	Низьковуглецева конструкційна сталь з високою пластичністю та низькою твердістю; застосовується як контрастний матеріал у дослідженнях зношування і контактної взаємодії, а також як економічний варіант змінних фальцювальних планок за умови регламентованого сервісу.
10	Низьковуглецева конструкційна сталь з дещо вищою міцністю порівняно з 05кп; використовується для

	порівняльної оцінки впливу твердості матеріалу планки на умови фальцювання та стабільність формоутворення.
20	Низьковуглецева конструкційна сталь підвищеної міцності; застосовується для аналізу впливу зростання твердості та жорсткості матеріалу планки на контактні навантаження, знос і геометричну стабільність у процесі фальцювання.

Разом із тим, у виробничій практиці з міркувань економії та ремонтпридатності фальцювальні планки можуть виготовлятися не лише з корозійностійких сталей, але й з низьковуглецевої групи (05кп–20). Такий підхід є виправданим насамперед для обладнання з високою інтенсивністю експлуатації, де планка розглядається як витратний змінний елемент, що підлягає регулярному відновленню або заміні в межах регламентного обслуговування [56].

Експлуатаційні переваги низьковуглецевих сталей полягають у нижчій вартості матеріалу, високій технологічності виготовлення (оброблюваність різанням, шліфуванням, поліруванням) та простоті відновлення профілю робочої кромки/поверхні в умовах ремонтної дільниці. Це дозволяє оперативно підтримувати геометрію планок і стан поверхні без суттєвих витрат, що особливо актуально при зміні типорозмірів розгортки, режимів фальцювання або при підвищених вимогах до стабільності якості тиражу [56].

Водночас застосування низьковуглецевих сталей супроводжується експлуатаційними обмеженнями. За наявності вологи, залишків водорозчинних адгезивів (зокрема ПВА) та продуктів очищення вуглецеві сталі є більш схильними до корозії, що прискорює деградацію мікрогеометрії, зростання шорсткості та зміну коефіцієнта тертя в контактній зоні, а отже – може знижувати повторюваність процесу фальцювання [56].

Тому доцільність їх використання визначається не лише економічним фактором, але й можливістю забезпечити керований стан робочої поверхні протягом заданого ресурсу.

З експлуатаційної точки зору використання низьковуглецевих сталей є найбільш обґрунтованим у таких випадках [56]:

- коли фальцювальний вузол працює з регламентованим сервісом (планове очищення від клею, контроль корозійних проявів, періодичне шліфування/полірування);

- коли технологічний процес передбачає швидку заміну планок і невисоку вартість простою;

- коли для підвищення ресурсу застосовуються доступні методи поверхневого зміцнення/модифікації (наприклад, поверхнєве пластичне деформування, формування зміцнювального мікрорельєфу, локальне зміцнення робочої зони) або захисні підходи в експлуатації (обмеження контакту з вологою, своєчасне видалення клейових відкладень) [56].

Отже, корозійностійкі сталі доцільні як матеріал для планок із підвищеними вимогами до стабільності мікрогеометрії та роботи у вологих/клейових середовищах, тоді як низьковуглецеві конструкційні сталі можуть бути раціональним вибором як економічна альтернатива за умови керованої експлуатації, планового обслуговування та/або застосування технологій поверхневого зміцнення, що забезпечують прийнятний ресурс і стабільну якість фальцювання інтегральних обкладинок [56].

Знос фальцювальних планок у процесі фальцювання інтегральних обкладинок є багатофакторним процесом, який визначається як властивостями матеріалу пластин і розгортки, так і режимами роботи фальцювально-склеювальної лінії. Для кількісної оцінки зносу фальцювальних планок доцільно виходити з лінійного закону, згідно з яким об'ємний або лінійний знос прямо пропорційний нормальному навантаженню, шляху ковзання та коефіцієнту зношування матеріалу. Узагальнено це можна подати у вигляді [56]:

$$D = k_w p s, \quad (2.4.4)$$

де D – міра зносу (лінійна або об'ємна), k_w – коефіцієнт зношування, що залежить від матеріалу фальцювальної планки та умов тертя, p – середній

контактний тиск, s – шлях ковзання у зоні контакту планки з розгорткою інтегральної обкладинки.

З урахуванням того, що шлях ковзання s визначається добутком швидкості відносного переміщення V та часу контакту t , вираз (2.4.4) можна переписати [56] як

$$D = k_w p V t. \quad (2.4.5)$$

Така форма є зручною для аналізу впливу режимних параметрів роботи фальцапарату (швидкість машини, тривалість контакту, навантаження на планки) на інтенсивність зносу.

Для подальшого узагальнення доцільно перейти від оцінки зносу за окремими параметрами до інтегрованого показника ресурсу робочої поверхні планки. У цьому випадку знос можна розглядати як багатofакторну функцію експлуатаційних і конструктивних параметрів [56]:

$$Z = F(V, P_n, \mu, H, R_a, T), \quad (2.4.6)$$

де Z – інтегрований показник зношування (наприклад, відносна втрата висоти профілю або зменшення радіуса заокруглення робочої кромки);

V – швидкість транспортування розгорток;

P_n – нормальне навантаження на фальцювальну планку;

μ – коефіцієнт тертя в контактi “планка – розгортка”;

H – твердість матеріалу планки;

R_a – параметр шорсткості / мікрорельєфу робочої поверхні;

T – температура в зоні контакту.

У подальших дослідженнях модель (2.4.6) конкретизується шляхом вибору виду функції $F(\cdot)$ і визначення коефіцієнтів чутливості за експериментальними даними для сталей 05кп і 08Х18Н10Б, що дає змогу кількісно оцінювати вплив мікрорельєфного зміцнення на зносостійкість фальцювальних планок [56].

Числова реалізація такої моделі потребує емпіричного визначення коефіцієнтів і калібрування на основі експериментальних даних для конкретних типів фальцювальних ліній, але натомість забезпечує можливість

прогнозування ресурсу пластин та обґрунтування раціональних режимів їх експлуатації [56].

З урахуванням наведених залежностей і порівняльного аналізу матеріалів одним з ефективних шляхів підвищення зносостійкості фальцювальних пластин із корозійностійкої сталі 08X18H10Б є формування зміцненого поверхневого шару з керованим мікрорельєфом. Застосування технологій поверхневого пластичного деформування з формуванням мікрорельєфних напрямних дає змогу зменшити інтенсивність зносу, стабілізувати геометрію робочої поверхні та продовжити ресурс роботи пластин. Зміцнений шар підвищує опір механічним пошкодженням і деформаціям, а поєднання високої корозійної стійкості корозійностійкої сталі з модифікованими трибологічними властивостями забезпечує більш стабільні умови тертя в парі «обкладинка – пластина» [56].

Отже, профільні фальцювальні планки є елементом фальцапарату, від якого залежить не лише геометрична точність формування інтегральної обкладинки, а й стабільність якості видання впродовж тиражу. Забезпечення їхньої працездатності й своєчасне відновлення робочих поверхонь безпосередньо впливають на обсяги браку та кількість відходів, пов'язаних із заміною зношених деталей [56].

Узагальнення результатів аналізу свідчить, що вибір марки корозійностійкої сталі, поєднаний із застосуванням раціональних схем поверхневого зміцнення та формуванням керованого мікрорельєфу, є визначальним чинником забезпечення зносостійкості фальцювальних планок. Застосування механіко-математичних моделей зношування дає змогу кількісно оцінювати вплив швидкості фальцювання, нормального навантаження, умов тертя та параметрів мікрогеометрії робочої поверхні на інтенсивність втрати профілю [56].

Це створює основу для обґрунтованого вибору матеріалу й режимів обробки фальцювальних пластин, спрямованих на підвищення їхнього ресурсу, стабільності контактних параметрів у зоні фальца та зменшення

ймовірності розвитку пошкоджень інтегральних обкладинок у процесі експлуатації.

2.5. Вплив мікрорельєфного зміцнення на експлуатаційні характеристики профільних фальцювальних планок з корозійностійкої сталі

2.5.1. Передумови та технологічні принципи формування зміцнювального мікрорельєфу профільних фальцювальних планок

Як показано в підрозділах 2.4.1–2.4.3, профільні фальцювальні планки з корозійностійкої сталі працюють в умовах інтенсивного циклічного навантаження, ковзного тертя та дії клейових систем. Це обумовлює високі вимоги до їхньої зносостійкості, стабільності геометрії профілю та здатності забезпечувати рівномірне згинання розгортки інтегральних обкладинок. Одним із найбільш перспективних напрямів підвищення експлуатаційних характеристик таких планок є формування зміцненого поверхневого шару з керованим мікрорельєфом.

Мікрорельєфні напрямні дають змогу перерозподіляти контактні напруження, знижувати локальні піки тиску, покращувати умови тертя в парі «клапан обкладинки – фальцювальна планка» та тим самим збільшувати ресурс роботи деталей. Формування мікрорельєфу на робочій поверхні фальцювальних планок забезпечує комплексний ефект [56]:

- антифрикційний – зменшення ефективного коефіцієнта тертя за рахунок оптимізації реальної площі контакту та появи мікроканалів, по яких можуть відводитись частинки зносу й залишки клею;
- зміцнювальний – підвищення твердості й опору поверхневого шару пластичній деформації завдяки локальному ущільненню металу;
- ресурсний – зменшення швидкості зношування профілю, стабілізація геометрії та зниження ризику появи локальних заглибин, що викликають дефекти фальцювання.

Нанесення мікрорельєфу доцільно здійснювати не по всій довжині профільної планки, а лише в зонах інтенсивного і повторюваного контакту з клапанами інтегральних обкладинок. Такий підхід дозволяє [56]:

- зосередити зміцнення саме там, де виникають максимальні контактні напруження;
- мінімізувати деформацію матеріалу поза робочою зоною;
- зберегти необхідну гладкість поверхні на ділянках, де надмірний мікрорельєф може погіршувати якість фальцювання [56].

На рис. 2.5.1 схематично показано фрагмент профільної фальцювальної планки з виділенням робочої ділянки та траєкторії руху індентора під час формування мікрорельєфних напрямних [56].

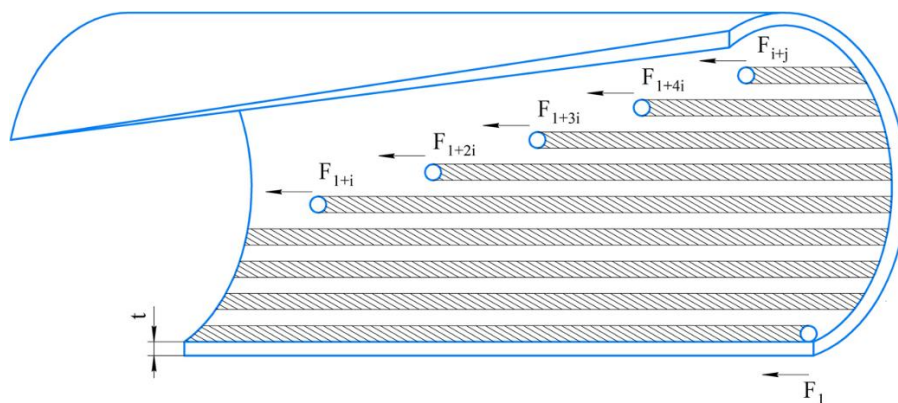


Рис. 2.5.1. Модель формування мікрорельєфних напрямних на профільній фальцювальній планці: фрагмент робочої поверхні (у збільшеному масштабі) та траєкторія навантаження індентора; t – товщина інструментальної заготовки; F_1 – початкове контактне зусилля і напрям деформування; F_{1+i} , F_{1+2i} , F_{i+j} – зміна величини та орієнтації зусилля на наступних стадіях формування мікроструктури

Орієнтація мікроканалов уздовж напрямку руху клапана обкладинки сприяє стабілізації його траєкторії, зменшенню поперечних зміщень та рівномірному розподілу навантаження по ширині контакту.

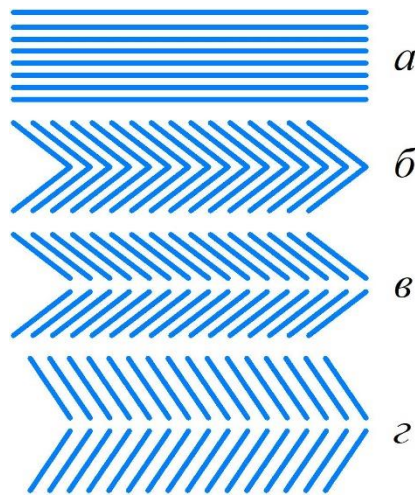


Рис. 2.5.2. Профілі мікрорельєфних напрямних: *a* – поздовжній паралельний; *б* – шевронний профіль, «herringbone»; *в* – асиметричний шевронний профіль; *г* – кутовий напрямний.

Внаслідок рівномірного розподілу навантаження на мікрорельєфних ділянках знижується ймовірність утворення заломів, надривів або локальних вм'ятин на клапанах обкладинок, що особливо важливо при роботі з хром-ерзац-картоном і комбінованими палітурними матеріалами.

2.5.2. Конструкція та матеріали інденторів для формування мікрорельєфу

Провідна роль у забезпеченні стабільності й відтворюваності мікрорельєфу відіграє індентор, яким здійснюється локальне пластичне деформування поверхні планки. До індентора висуваються такі основні вимоги зміна величини та орієнтації зусилля на наступних стадіях формування мікроструктури [56]:

- твердість, яка перевищує твердість матеріалу фальцювальної планки;
- висока зносостійкість та збереження форми робочої частини протягом усього ресурсу;
- термостійкість і стійкість до корозійного впливу в умовах поліграфічного виробництва;
- мінімальна схильність до сколювання й утворення мікротріщин.

Для реалізації цих вимог доцільно застосовувати індентори з алмазного композиційного термостійкого матеріалу підвищеної зносостійкості (АКТМ+). На рис. 2.5.2 наведено конструкцію наконечника індентора з композиту АКТМ+, який використовується для утворення порошкового алмазного мікрорельєфу на профільних фальцювальних планках інтегральних обкладинок [56].

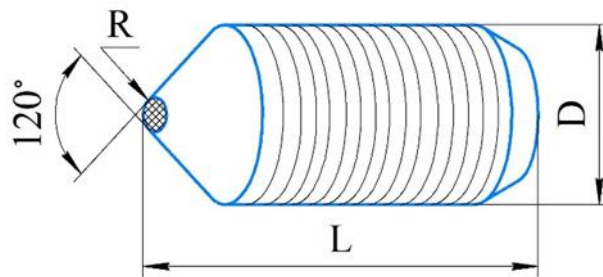


Рис. 2.5.2. Конструктивне виконання наконечника індентора з армованого алмазного композиційного термостійкого матеріалу АКТМ+: R – радіус сферичної робочої частини; L – загальна довжина наконечника; D – зовнішній діаметр наконечника [56].

Алмазний композиційний термостійкий матеріал АКТМ+ містить полікристалічний алмаз у поєднанні з матрицею та армувальними компонентами у вигляді багат шарових графенів ($n \geq 2$) у кількості 0,01–0,30 % за масою. Така структура забезпечує високу твердість, термостійкість, стійкість до сколювання й тривалу зносостійкість навіть за умов інтенсивного контактного навантаження [56].

Геометричні параметри індентора (радіус сферичної частини R, довжина конусної ділянки, кут загострення, форма переходів між частинами) визначають:

- розмір і глибину окремих елементів мікрорельєфу;
- форму мікроканалов (округлі, гострі, плоскопаралельні тощо);
- характер розподілу напружень у зоні вдавлювання.

На рис. 2.5.3 і 2.5.4 [56] показано типові варіанти конструкції інденторів з алмазним наконечником у корпусі з конструкційного матеріалу, що

забезпечують необхідну жорсткість закріплення, демпфування вібрацій та можливість регулювання виступу робочої частини.

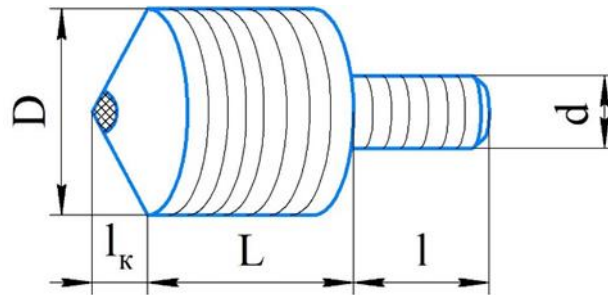


Рис. 2.5.3. Конструктивна схема індентора з алмазним робочим наконечником, встановленого в корпусі: D – діаметр корпусної частини; d – діаметр хвостовика; L – довжина корпусної частини; l – довжина закріплювальної (монтажної) ділянки; l_k – довжина конічної частини [56].

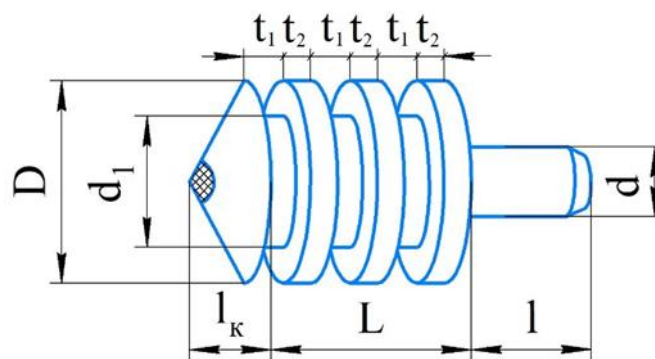


Рис. 2.5.4. Конструкція індентора з алмазним наконечником у корпусі підвищеної жорсткості: D – зовнішній діаметр корпусу; d_1 – внутрішній діаметр у зоні конічної частини; d – діаметр хвостової частини; L – довжина корпусу; l – довжина монтажної ділянки; l_k – довжина конічної частини; t , t_1 , t_2 – параметри кільцевих жорсткісних виступів [56].

Таким чином, конструкція індентора з АКТМ+ у поєднанні з раціонально підібраними геометричними параметрами забезпечує формування стабільного, відтворюваного мікрорельєфу на робочих поверхнях профільних фальцювальних планок.

2.5.3. Класифікація інденторів та кінематика формування мікрорельєфу

Для систематизації варіантів конструкції та режимів застосування запропоновано класифікацію інденторів [56], що враховує тип контактної взаємодії, форму робочої частини, матеріал та кінематику процесу.

За типом контактної взаємодії [56]:

- *точкові індентори* – формують дискретні вдавлення (окремі комірки мікрорельєфу);
- *лінійні індентори* – утворюють безперервні борозни або лінійні структури вздовж напрямку руху клапана.

За формою індентора [56]:

- *конусоподібні* – для створення конічних відбитків у точкових технологіях;
- *кулькові* – формують круглі вдавлення, придатні для рівномірних комірчастих структур і м'якого переходу від деформованої до недеформованої зони;
- *плоскі* – дають ширші та більш розмиті за формою вдавлення, доцільні для окремих типів мікрорельєфу, де потрібні «приплющені» канали.

За матеріалом виготовлення [56]:

- *алмазні індентори* – для високоточної обробки з формуванням гострих і виразних мікроструктур;
- *карбідні індентори* – забезпечують високу зносостійкість і застосовуються для грубішого мікрорельєфу.

За способом утворення мікрорельєфу [56]:

- *статичні індентори* – працюють без відносного переміщення індентора по поверхні (формують одиничні відбитки);
- *динамічні індентори* – переміщуються вздовж поверхні пластини, створюючи лінійні або комбіновані структури мікрорельєфу.

У випадку профільних фальцювальних планок для інтегральних обкладинок найбільш доцільним є застосування кулькових алмазних

інденторів динамічної дії, що формують спрямовані мікроканавки уздовж траєкторії руху клапана. Така кінематична схема забезпечує:

- узгодженість напрямку мікрорельєфних напрямних із напрямком технологічного руху розгортки;
- стабілізацію процесу фальцювання на високих швидкостях;
- зменшення поперечних сил, які можуть призводити до перекосів і деформацій клапанів [56].

2.5.4. Алмазне вигладжування, оптимізація режимів та оцінювання ефективності мікрорельєфного зміцнення

Алмазне вигладжування використовується як завершальний етап формування зміцненого поверхневого шару [56]. Воно дозволяє:

- зменшити початкову шорсткість після вдавлювання;
- стабілізувати геометрію мікрорельєфу;
- додатково ущільнити приповерхневий шар, підвищуючи його твердість і опір зносу.

Оптимальний режим алмазного вигладжування визначається поєднанням параметрів шорсткості S , зусилля притискання A , температури обробки T та швидкості вигладжування V . Це узагальнюється формулою (2.5.1), у якій функція $f(S, A, T, V)$ описує взаємозв'язок між цими параметрами та цільовим критерієм якості поверхні [56].

$$Z = K \cdot \left(\frac{F}{A}\right)^{\alpha} \cdot d^{\beta} \cdot E^{\gamma}, \quad (2.5.1)$$

де Z – індикатор зміцнення поверхні, K – константа, яка залежить від специфіки обробки та обладнання, F – тиск індентора, A – площа контакту індентора, d – глибина проникнення індентора, E – модуль Юнга, а α , β , та γ – емпірично визначені експоненти, які описують вплив відповідних параметрів.

Така функція повинна бути ідентифікована на основі експериментальних досліджень. Практичне використання моделі дозволяє [56]:

- підібрати режими, що забезпечують максимальне зміцнення без надмірного зносу індентора;
- мінімізувати ризик пластичної деформації або перегріву матеріалу пластини;
- встановити технологічні «вікна» параметрів для різних типів нержавіючих сталей і конструкцій планок.

Попри значні переваги, технологія мікрорельєфного зміцнення потребує врахування низки ризиків [56]:

- неоднорідність мікрорельєфу може призвести до нерівномірного розподілу навантаження, появи локальних зон підвищеного тиску й прискореного зносу;
- похибки виготовлення інденторів і їх кріплення здатні спричинити відхилення форми мікроканалок від розрахункової;
- високі вимоги до обладнання (жорсткість, точність подач, стабільність швидкості) підвищують вартість впровадження технології;
- неправильно підібрані параметри обробки можуть викликати надмірне ущільнення приповерхневого шару і появу залишкових напружень, які знижують втомну міцність.

З іншого боку, за умови коректного вибору матеріалу індентора, геометрії мікрорельєфу та режимів обробки, мікрорельєфне зміцнення дозволяє істотно [56]:

- збільшити ресурс фальцювальних планок;
- підвищити стабільність процесу фальцювання на високих швидкостях;
- забезпечити кращу узгодженість між властивостями картонних матеріалів і характеристиками робочої поверхні планки.

Подальший розвиток технології мікрорельєфного зміцнення фальцювальних планок доцільно пов'язувати з:

- побудовою уточнених математичних моделей зв'язку між параметрами мікрорельєфу, режимами обробки та характеристиками зносу;

- оптимізацією форми та розташування мікроканалок з урахуванням траєкторії руху клапанів обкладинок;
- вивченням впливу мікрорельєфу на адгезійну взаємодію з клейовими композиціями та на якість приклеювання клапанів;
- розробленням рекомендацій щодо вибору інденторів і режимів обробки для різних марок нержавіючих сталей [56].

Таким чином, мікрорельєфне зміцнення поверхневого шару профільних фальцювальних планок із корозійностійкої сталі виступає ефективним інструментом технологічного забезпечення їх зносостійкості та стабільної роботи, а також формує науково обґрунтовану базу для подальшого аналітичного дослідження дефектів мікрорельєфу, що розглядається у підрозділі 2.5.

2.6.Дефекти мікрорельєфного зміцнення профільних фальцювальних планок та обмеження застосування сучасних технологій

2.6.1.Проблематика дефектів мікрорельєфного зміцнення фальцювальних планок та їх вплив на якість інтегральних обкладинок

До першочергових дефектів мікрорельєфного шару належить, насамперед, неоднорідність мікрорельєфу по довжині та ширині робочої ділянки фальцювальної планки. Вона проявляється у зміні глибини, кроку та форми мікроканалок, порушенні їх регулярності, появі ділянок із надмірним або недостатнім деформуванням поверхні. Такі відхилення призводять до нерівномірного розподілу контактних напружень у зоні «клапан обкладинки – планка», що, у свою чергу, викликає локальні піки тиску, появу заломів, вм'ятин чи мікротріщин на картоні. Нерівномірний тиск під час фальцювання погіршує геометрію згинів, сприяє появі перекосів, відхилень ширини фальців та погіршенню суміщення обкладинки з книжковим блоком.

Окрему групу становлять технологічні дефекти, пов'язані з похибками виготовлення мікрорельєфних структур. Вони можуть бути зумовлені неточним позиціонуванням індентора, нестабільністю зусилля вдавлювання,

флуктуаціями швидкості переміщення або вібраціями обладнання. У таких випадках формуються мікроканавки з відмінними параметрами на різних ділянках планки, що ускладнює керування процесом фальцювання. Крім того, помилки при профілюванні після нанесення мікрорельєфу можуть спричинити часткове зрізання або деформацію елементів мікрорельєфу, утворення гострих кромek і концентраторів напружень. Це не лише знижує ефективність зміцнення, а й створює передумови для прискореного зносу та локального руйнування як планок, так і матеріалу обкладинок.

До важливих чинників ризику належить невідповідність параметрів мікрорельєфу властивостям оброблюваних матеріалів. Розгортки інтегральних обкладинок можуть виготовлятися з різних видів хром-ерзац-картону, комбінованих палітурних матеріалів, ламінованих та покритих лаком основ, які суттєво відрізняються за товщиною, жорсткістю, модулем пружності та чутливістю до локальних навантажень. Мікрорельєф, оптимальний для одного матеріалу, може виявитися надмірно агресивним для іншого, викликаючи підвищене тріщиноутворення у згинальній зоні або, навпаки, недостатню стабілізацію руху клапана. Таким чином, без урахування властивостей матеріалу обкладинки мікрорельєфне зміцнення може призвести до появи дефектів фальцювання, що не компенсуються іншими регулюваннями процесу.

Суттєву роль відіграють також експлуатаційні дефекти, пов'язані з прискореним зносом мікрорельєфного шару. Навіть за правильно обраних початкових параметрів, в умовах високошвидкісного фальцювання, інтенсивного тертя, дії клейових композицій і абразивності паперово-картонних матеріалів мікрорельєф поступово згладжується, деформується і забруднюється. Виникають ділянки із «виробленим» мікрорельєфом, де втрачається його зміцнювальна та антифрикційна функція, що з часом проявляється у збільшенні зусилля фальцювання, зростанні ймовірності дефектів згину та погіршенні стабільності роботи фальцювальної системи. За відсутності своєчасного контролю стану мікрорельєфу та регламентів його

відновлення це може скорочувати життєвий цикл фальцювальних планок і збільшувати виробничі витрати.

Застосування технологій мікрорельєфного зміцнення вимагає високого рівня точності та відтворюваності процесу, що, своєю чергою, обумовлює значні вимоги до обладнання та кваліфікації персоналу. Використання інденторів із алмазного композиційного матеріалу та спеціалізованих систем подачі й позиціонування призводить до підвищення вартості оснащення й складності його обслуговування. Помилки налаштування, некоректний вибір режимів, відсутність належного контролю параметрів процесу можуть призвести до появи прихованих дефектів, які на етапі наладки не виявляються, але проявляються впродовж тиражу у вигляді нестабільності якості фальцювання. Таким чином, поряд з технологічними й матеріалознавчими аспектами, важливого значення набувають організаційні та економічні фактори застосування мікрорельєфного зміцнення.

Важливою особливістю є те, що дефекти мікрорельєфного шару нерозривно пов'язані з послідовністю технологічних операцій: застосування зміцнювальної обробки, подальше механічне формування профілю, налаштування фальцювальної лінії, експлуатаційний режим. Неправильно обрана послідовність (наприклад, профілювання після зміцнення без урахування впливу на мікрорельєф) може призвести до часткового руйнування зміцненого шару, появи структурних дефектів або залишкових напружень, що негативно позначається як на довговічності планок, так і на якості інтегральних обкладинок.

Отже, проблематика дефектів мікрорельєфного зміцнення фальцювальних планок охоплює комплекс взаємопов'язаних матеріалознавчих, технологічних і експлуатаційних чинників [58]. Їх систематизація та аналітичний розгляд є необхідною передумовою для подальшого моделювання процесів формування мікрорельєфу, оптимізації технологічної послідовності операцій та розроблення рекомендацій щодо вибору параметрів зміцнення. Саме на вирішення цих завдань спрямовані

подальші підрозділи розділу 2, у яких аналізуються можливості сучасних технологій поверхневого зміцнення та формуються вимоги до нових підходів, орієнтованих на плоскі профільні фальцювальні планки ліній для виготовлення інтегральних обкладинок.

2.6.2. Оптимізація технологій поверхневого зміцнення фальцювальних планок: аналітичний огляд методів крізь призму дефектів

До першої групи механічних методів поверхневого зміцнення віднесено методи поверхневого пластичного деформування (ППД) і вібраційного зміцнення, для яких характерним є формування зміцнювального мікрорельєфу внаслідок багаторазової дії контактних навантажень на поверхневий шар матеріалу [57, 61–63, 72]. У роботі [57, 72] розроблено математичні моделі динаміки формування регуляризованого мікрорельєфу під дією коливальних або ударних навантажень, що дозволяє прогнозувати розподіл напружень і параметри мікрогеометрії. Дослідження [61, 62, 72] систематизують механічні методи зміцнення (обкочування, накочування, віброобробка, кульове обдування), їх вплив на твердість, залишкові напруження та глибину зміцненого шару. У роботі [63, 72] акцентовано увагу на обмеженнях вібраційної обробки для тонкостінних і відповідальних деталей [72].

Для плоских фальцювальних планок такі методи є привабливими через можливість формування регулярного або частково регулярного мікрорельєфу з відносно невисокими енергетичними витратами. Водночас саме механічні способи ППД і віброобробки мають характерний набір типових дефектів [72]:

- нерівномірна глибина та крок мікрорельєфу через нестабільність зусилля, амплітуди або частоти коливань;
- локальні “перебиті” ділянки із надмірною пластичною деформацією, які утворюють концентратори напружень;
- грубий профіль канавок і комірок, що погіршує умови контакту з картоном і підвищує ризик мікропошкоджень матеріалу обкладинки;

- наклеп і надлишкове ущільнення приповерхневого шару, які в разі неправильного підбору режимів можуть знижувати втомну міцність деталей;
- чутливість до жорсткості системи “деталь–обладнання”: вібрації станини й неточність закріплення призводять до випадкових відхилень мікрорельєфу по довжині планки.

Для профільних фальцювальних планок це означає, що механічні методи ППД і вібраційного зміцнення потребують дуже точного контролю кінематики процесу та жорсткості технологічної системи. В іншому разі нерівномірність мікрорельєфу безпосередньо трансформується в нестабільність фальцювання, локальні піки тиску й дефекти згину.

Другу групу становлять хіміко-термічні методи (насамперед іонне азотування) та інтегровані термдеформаційні технології [58, 59, 70, 72]. У роботі [59] проаналізовано процес іонного азотування аустенітної сталі 316L: дифузійне насичення азотом приводить до формування зміцненого приповерхневого шару з підвищеною твердістю, зносостійкістю та корозійною стійкістю. Дослідження [58, 70, 72] описують інтегровані технології, що поєднують механічну обробку, термічний вплив і, за потреби, попереднє формування мікрорельєфу. Такі технології дозволяють гнучко керувати структурно-фазовим станом поверхневого шару, глибиною зміцнення та рівнем залишкових напружень стискання [72].

Перевага хіміко-термічних методів – можливість глибокого й рівномірного зміцнення без значних змін макрогеометрії деталі. Однак для плоских профільних фальцювальних планок із попередньо сформованим мікрорельєфом виникає низка специфічних дефектів і ризиків [72]:

- перегрів та термічні деформації, які можуть призвести до викривлення плоских планок, порушення геометрії профілю та зміни параметрів мікрорельєфу (часткове згладжування або “розкриття” канавок);
- нерівномірна глибина зміцнення у зонах складної мікрогеометрії, де доступ робочого середовища (іонізованого газу, плазми) обмежений;

- утворення крихких фазних прошарків при надмірній тривалості або неправильно підібраній температурі процесу, що знижує ударну в'язкість і може сприяти мікротріщиноутворенню;
- залишкові термічні напруження, що при поєднанні з дією циклічних навантажень у зоні фальцювання підвищують ризик втомних тріщин;
- чутливість до підготовки поверхні: неоднорідна шорсткість або забруднення перед азотуванням призводять до відмінностей у товщині та структурі зміцненого шару на різних ділянках планки [72].

Унаслідок цього, хіміко-термічні технології та інтегровані термодетформаційні обробки є перспективними для підвищення ресурсу фальцювальних планок, але вимагають дуже акуратної адаптації до плоских деталей зі сформованим мікрорельєфом. Будь-які похибки у виборі температурно-часових режимів можуть призвести до викривлення планок, деградації мікрорельєфу та виникнення внутрішніх дефектів, невидимих при первинному контролі [72].

Окрему групу становлять лазерні методи поверхневого зміцнення, до яких належать лазерна ударна обробка (Laser Shock Processing, LSP), лазерне наплавлення та формування зміцнювальних покриттів [60, 64, 69]. У роботі [60] досліджено вплив LSP на аустенітні нержавіючі сталі: лазерні імпульси високої потужності формують глибокі зони залишкових напружень стискання, підвищують твердість і зносостійкість без істотного нагріву основного металу. У дослідженнях [64, 69] розглянуто використання лазерного наплавлення для нанесення зносостійких шарів і формування функціональних покриттів з оптимізованою мікроструктурою [72].

Для фальцювальних планок лазерні методи цікаві тим, що дозволяють локально модифікувати приповерхневий шар у зонах інтенсивного контакту, потенційно поєднуючи зміцнення та формування потрібного мікрорельєфу. Водночас характеристичними для лазерних технологій є такі типові дефекти[72]:

- перегрів локальних ділянок при перевищенні енергії імпульсу або недостатньому відведенні тепла, що веде до оплавлення мікрорельєфу, зміни шорсткості та втрати точності профілю;
- мікротріщини в зоні термічного впливу, особливо в разі різкого охолодження або значних градієнтів температури;
- пористість і неметалеві включення у наплавлених шарах при некоректному виборі порошкових матеріалів чи параметрів наплавлення;
- відшарування або розтріскування покриттів унаслідок поганої адгезії до основного металу, відмінності коефіцієнтів термічного розширення та динамічних навантажень у процесі фальцювання;
- неоднорідна глибина зміненої зони при нестабільності енергетичних параметрів лазера, що призводить до різної твердості й зносостійкості на сусідніх ділянках планки;
- локальні концентратори напружень на межі “покриття – основний метал”, які можуть ініціювати втомні тріщини під дією циклічних навантажень [72].

Для плоских профільних фальцювальних планок це означає, що лазерні технології можуть бути ефективними лише за умови дуже точного контролю енергетики імпульсів, траєкторії обробки та складу матеріалів покриттів. У противному разі ризик утворення мікротріщин, відшарувань і викривлення мікрорельєфу є надто високим для використання таких методів у серійному виробництві інтегральних обкладинок [72].

Аналіз сучасних механічних (ППД, вібраційне зміцнення), хіміко-термічних (іонне азотування, інтегровані термдеформаційні обробки) та лазерних (LSP, наплавлення, покриття) технологій поверхневого зміцнення показує, що кожен із методів забезпечує суттєве підвищення зносостійкості та модифікацію трибологічних характеристик поверхні. Проте для плоских профільних фальцювальних планок із спрямованим мікрорельєфом ці технології мають спільну проблему: ризик виникнення дефектів мікрорельєфу

й профілю, які безпосередньо впливають на якість фальцювання та довговічність деталей [72].

Типовими для аналізованих методів є такі групи дефектів[72]:

- геометричні: нерівномірна глибина й крок мікрорельєфу, грубий профіль канавок, викривлення плоских планок;
- структурно-фазові: надлишковий наклеп, крихкі прошарки, неоднорідна глибина зміцнення;
- трибологічні: локальні концентратори напружень, зони підвищеного тертя, умови для прискореного зносу;
- адгезійно-експлуатаційні: відшарування покриттів, мікротріщини, пористість у наплавлених шарах [72].

Наявні дослідження [57–70] загалом спрямовані на підвищення зносостійкості деталей машин, але мало враховують специфіку плоских профільних фальцювальних планок і задачі формування керованого мікрорельєфу для процесу високошвидкісного фальцювання інтегральних обкладинок. Це обумовлює необхідність:

- розроблення моделей, які поєднують опис формування мікрорельєфу та виникнення дефектів при подальшому профілюванні й експлуатації;
- ідентифікації критичних технологічних параметрів, що визначають ризик появи дефектів;
- оптимізації послідовності операцій (зміцнення – формування профілю – налаштування фальцювальної лінії) з позицій мінімізації дефектів мікрорельєфу.

Саме на розв’язання цих завдань спрямовані подальші етапи дослідження в дисертаційній роботі, де буде виконано моделювання процесів формування мікрорельєфу на фальцювальних планках та оцінено вплив дефектів мікрорельєфного шару на їх експлуатаційні характеристики.

2.7. Технологічні підходи до застосування та зміцнення профільних фальцювальних планок при виготовленні інтегральних обкладинок

2.7.1. Технологічні аспекти фальцювання інтегральних обкладинок із застосуванням мікрорельєфно-зміцнених профільних планок

Фальцювально-склеювальні лінії для виготовлення інтегральних обкладинок працюють як узгоджена система, у якій профільні фальцювальні планки виконують функцію формувальних елементів, що задають геометрію згину клапанів та забезпечують стабільність процесу при високих швидкостях. З огляду на результати аналізу, наведені в підрозділах 2.4–2.6, саме стан робочої поверхні цих планок та наявність зміцнювального мікрорельєфу визначають рівномірність контактних напружень, стійкість до зносу й чутливість процесу фальцювання до змін властивостей матеріалу обкладинки.

Технологічна схема фальцювання (рис. 2.7.1) [72] передбачає транспортування розгорнутої двошарової заготовки інтегральної обкладинки з нанесеним клеєм на клапани та крайки через систему стаціонарних профільних планок 4_{lt} , 4_{rt} .

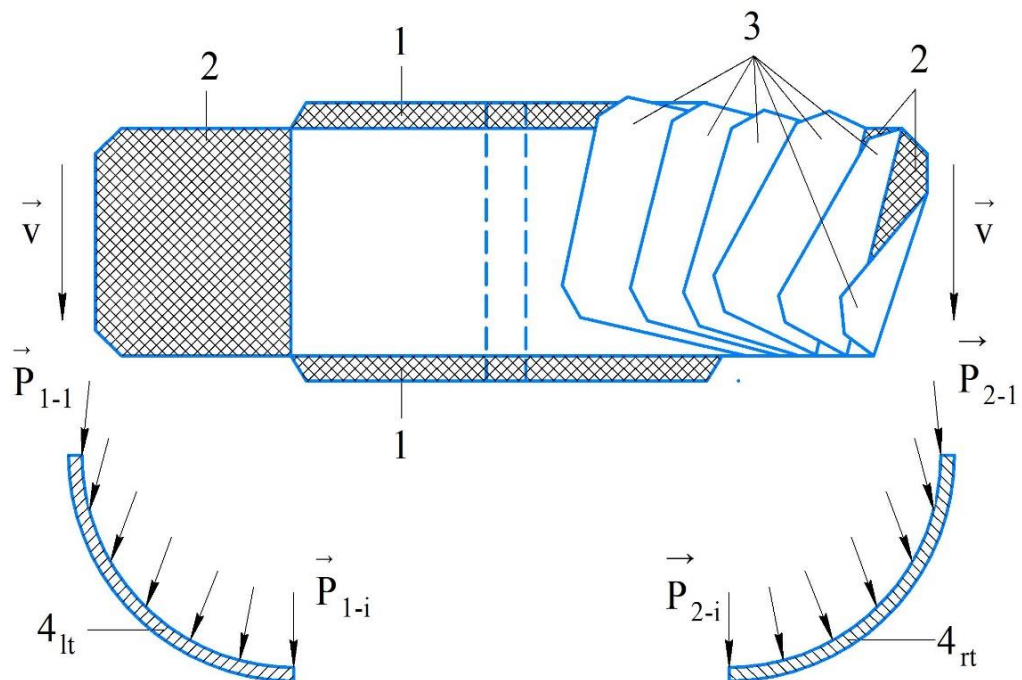


Рис. 2.7.1. Схематичне представлення процесу формування фальца клапанів інтегральної обкладинки із застосуванням профільних планок: 1, 2 – крайки та клапани з нанесеним клейовим шаром; 3 – послідовні стадії профільного

згину; 4_{lt} , 4_{rt} – ліва та права фальцювальні планки; $\overrightarrow{P_{1-1}}$, $\overrightarrow{P_{1-i}}$, $\overrightarrow{P_{2-1}}$, $\overrightarrow{P_{2-i}}$ – контактні зусилля в зоні формоутворення; $\vec{v}$ – напрямок і швидкість переміщення розгортки під час фальцювання [72]

У зоні взаємодії заготовки з планками відбувається поетапне згинання клапанів та їх притискання до основи обкладинки, причому просторовий профіль планок задає траєкторію згину й розподіл тиску в зоні фальцювального контакту. Узгодження параметрів профілю планок із геометрією клейових ділянок дозволяє мінімізувати локальні перенавантаження, ризик зминання картону та відшарувань у зоні фальца [72].

У сучасних фальцювально-склеювальних механізмах застосовують різні типи фальцювальних планок із заданим профілем (табл. 2.7.1), які відрізняються як геометрією просторового профілю, так і можливостями регулювання технологічних параметрів. Прямолінійні (стандартні) планки використовують для формування типових згинів із невисокими вимогами до варіативності профілю [72].

Таблиця 2.7.1.

Номенклатура та параметризація фальцювальних планок із заданою конфігурацією профілю

№	Типи планок	Особливості	Переваги
1	Прямолінійні (стандартні)	Простий прямолінійний профіль із майже постійним радіусом згину; забезпечує стабільну траєкторію руху заготовки та рівномірний контакт уздовж робочої ділянки планки.	Забезпечують однорідний розподіл тиску при стандартних згинах; слугують базовою конфігурацією для нанесення й відновлення мікрорельєфного зміцнення; характеризуються простотою налаштування й низькою вартістю виготовлення та обслуговування.
2	Конічні	Профіль зі змінною висотою або шириною по довжині планки, що забезпечує поступову зміну глибини згину й рівня контактного тиску.	Дають змогу керувати перерозподілом тиску вздовж траєкторії згину, зменшуючи пікові навантаження; полегшують адаптацію мікрорельєфних напрямних до різної товщини та жорсткості матеріалів; придатні для реалізації більш

			складних конструкцій інтегральних обкладинок.
3	Евольвентні	Криволінійний просторовий профіль, наближений до природної лінії згину картону; забезпечує плавну зміну кривини та стабільну траєкторію фальцювання.	Забезпечують високу однорідність деформації та тиску в зоні згину, мінімізують локальні концентратори напружень; особливо ефективні у поєднанні з мікрорельєфним зміцненням для формування фальців на обкладинках зі складною геометрією та підвищеними вимогами до якості згину.
4	З регульованим кутом згину	Конструкція з можливістю механічного чи програмного регулювання кута згину й, за потреби, довжини активної ділянки профілю відповідно до вимог конкретної обкладинки й матеріалу.	Дають змогу точно налаштувати траєкторію згину та рівень контактного тиску для різних форматів і типів картону; забезпечують узгодження положення мікрорельєфних напрямних із зонами максимальних навантажень, що підвищує ефективність зміцнення та зменшує ризик дефектів фальцювання.
5	З інтегрованими нагрівальними елементами	Профільні планки з локальним підігрівом робочої зони, що поєднують механічний вплив із контрольованим термопластичним розм'якшенням матеріалу в зоні згину.	Забезпечують більш рівномірний розподіл тиску та деформації при фальцюванні жорстких, ламінованих або багатошарових матеріалів; у поєднанні з мікрорельєфним зміцненням знижують ризик тріщин, заломів і локальних перенавантажень, підвищуючи відтворюваність геометрії фальца та стабільність процесу.
6	Комбіновані з регульованою довжиною	Комбінований профіль із можливістю змінювати довжину активної ділянки фальцювання та конфігурацію окремих сегментів профілю під конкретний формат розгортки й схему нанесення клею.	Забезпечують високу універсальність налаштувань для різних форматів інтегральних обкладинок; дають змогу узгодити довжину й положення зони дії мікрорельєфних напрямних із ділянками підвищеного тиску, що сприяє більш однорідному контакту, підвищеній зносостійкості планок і стабільній якості фальцювання.

Конічні та евольвентні планки забезпечують плавне змінення глибини та радіуса згину, що важливо для складніших конструкцій обкладинок та компенсування анізотропії картону. Планки з регульованим кутом згину й довжиною робочої ділянки дають змогу адаптувати процес до різних форматів та товщин матеріалу, а конфігурації з інтегрованими нагрівальними елементами доцільні при роботі з жорсткими чи ламінованими основами [72].

Вибір типу планок визначається проектними вимогами до обкладинки (формат, тип картону, наявність ламінації чи лаків), допустимими деформаціями у зоні фальца та цільовою продуктивністю лінії. В контексті даної дисертаційної роботи особливий інтерес становлять профільні планки з фіксованою просторовою геометрією, на робочу поверхню яких нанесено зміцнювальний мікрорельєф [72]. Саме така комбінація дозволяє поєднати стабільність траєкторії згину з керованим перерозподілом контактних напружень, що було показано в підрозділі 2.6.

Мікрорельєфне зміцнення робочих поверхонь планок забезпечує низку важливих технологічних ефектів. По-перше, регуляризований мікрорельєф формує сприятливий режим тертя в парі «клапан – планка», зменшуючи ковзання та ризик локального прослизання заготовки при високих швидкостях. По-друге, мікрорельєфні напрямні дозволяють згладити пікові значення контактного тиску, які виникають у місцях суміщення згину та клеєвих сегментів, тим самим знижуючи ймовірність мікротріщин, заломів і небажаних деформацій картону. По-третє, зміцнений поверхневий шар підвищує зносостійкість планок, збільшуючи міжремонтний ресурс та зменшуючи витрати на їх заміну [72].

Завдяки цим ефектам профільні планки з мікрорельєфним зміцненням виступають важливим інструментом для забезпечення стабільної якості фальцювання інтегральних обкладинок у масовому виробництві. Вони не лише підвищують точність формування фальца, а й роблять процес менш чутливим до змін у властивостях матеріалу, умовах нанесення клею та режимах роботи лінії.

2.7.2. Аналіз технологічних підходів до формування та зміцнення профільних фальцювальних планок: економічна ефективність та технічні перспективи

Як показано в попередніх підрозділах, якість фальцювання інтегральних обкладинок суттєво залежить від поєднання двох факторів: геометрії профілю

фальцювальної планки та стану її зміцненого мікрорельєфного шару. Відповідно, пріоритетним завданням є вибір такої технологічної послідовності операцій, яка забезпечує збереження цілісності мікрорельєфу, рівномірний розподіл напружень у матеріалі планки та стабільні експлуатаційні властивості інструмента протягом усього ресурсу роботи [72].

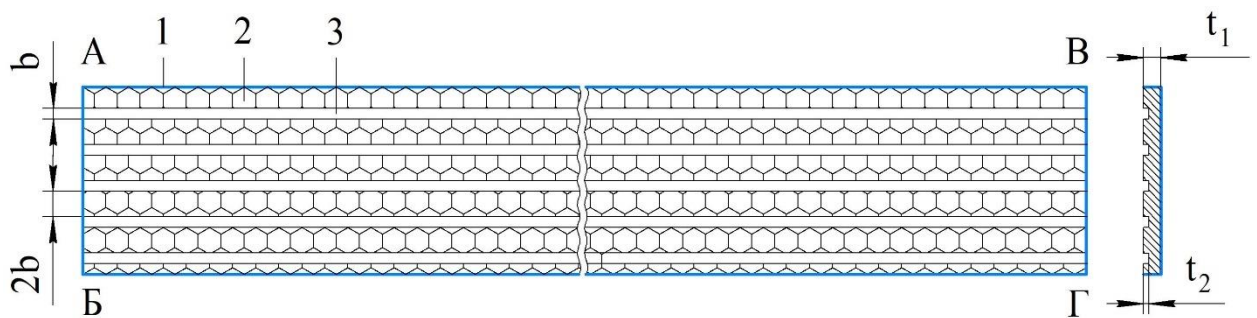
Для профільних фальцювальних планок із мікрорельєфним зміцненням можна виокремити два принципово різні технологічні підходи [72]:

1. послідовність «мікрорельєф → профілювання» – спочатку формують мікрорельєфні напрямні на плоскій пластині, далі заготовку деформують у просторовий профіль;

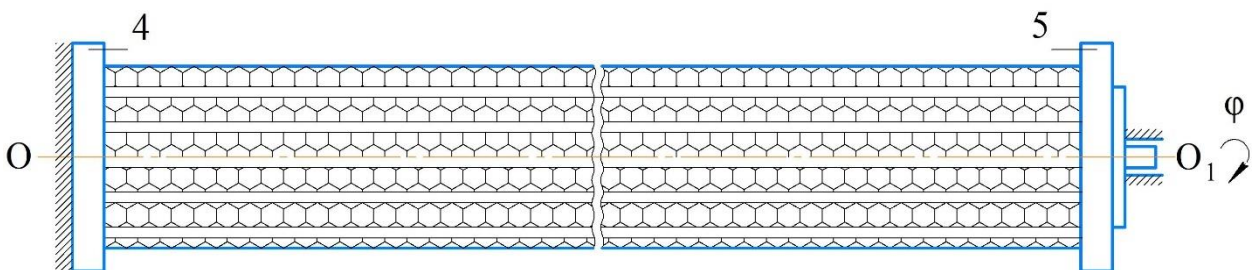
2. послідовність «профілювання → мікрорельєф» – спочатку створюють необхідний просторовий профіль планки, а потім формують зміцнювальні мікрорельєфні напрямні на вже профільованій робочій поверхні.

Підхід 1: спочатку мікрорельєф, потім профілювання [72].

За першою схемою на одній із плоских поверхонь планки попередньо наносять регулярний мікрорельєфний шар (напрямні або полігональну структуру), після чого заготовку деформують у просторовий профіль шляхом поздовжнього скручування або комбінованого згину (рис. 2.7.2, а–в) [72].



а



б

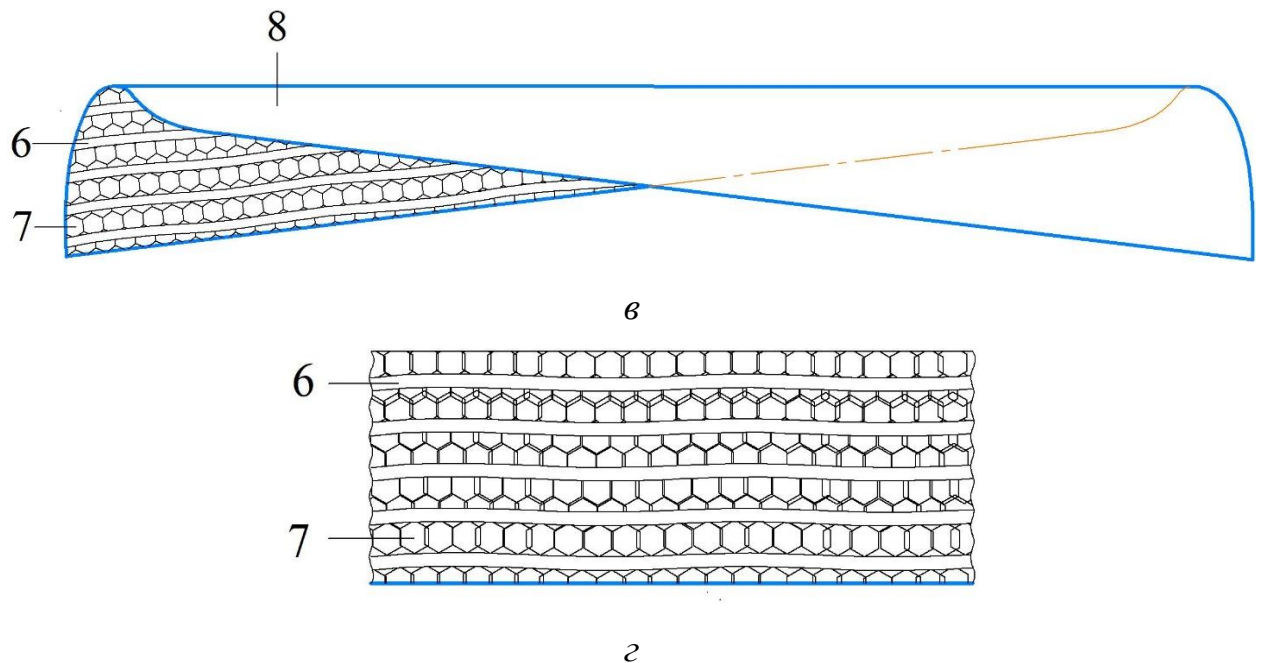


Рис. 2.7.2. Етапи утворення дефектів мікрорельєфу фальцювальних планок із заданим профілем, *а* – плоска планка з мікрорельєфом, *б* – формування заданого профілю, *в* – дефекти мікрорельєфу після формування профілю, *г* – фрагмент планки (збільшено) з дефектами мікрорельєфу, 1 – пластина, 2 – гексагональний мікрорельєф, 3 – мікрорельєфні напрямні, 4 – нерухомий затискач, 5 – рухомий (поворотний) затискач, 6 – дефекти мікрорельєфних напрямних, 7 – зміни в гексагональній побудові мікрорельєфу, 8 – планка із заданим профілем, t_1 – товщина планки, t_2 – мікрорельєфні заглибини, b – ширина мікрорельєфних напрямних, $2b$ – відстань між напрямними [72].

Така послідовність технологічно проста: нанесення мікрорельєфу на плоску деталь легко реалізувати на стандартному обладнанні поверхневого зміцнення; застосовуються відпрацьовані режими ППД, індентування або лазерного текстурування.

Однак деформація вже зміцненого поверхневого шару призводить до перерозподілу напружень і локальних перевантажень у зонах максимальної кривини профілю. Це створює ризики [72]:

- порушення геометрії мікрорельєфних комірок (витягування, сплюснення, зсув);

- утворення мікротріщин і розшарувань у приповерхневій зоні, особливо в місцях концентраторів напружень;
- розриви або «змазування» напрямних (рис. 2.7.2, г), що знижує ефективність керування тертям і зносостійкістю;
- нерівномірність глибини та кроку мікрорельєфу по довжині профільної ділянки, що погіршує однорідність тиску на матеріал обкладинки.

З економічної точки зору такий підхід привабливий у короткостроковій перспективі: обробка плоских заготовок є менш складною і дешевшою, не потребує спеціалізованих пристроїв для доступу до профільованої поверхні. Водночас ризик пошкодження мікрорельєфу при деформації збільшує частку браку, потребу у повторному зміцненні або заміні планок, що підвищує експлуатаційні витрати [72].

Отже, схема «мікрорельєф → профілювання» може бути прийнятною для менш складних профілів, невеликих тиражів та умов, де вимоги до точності мікрорельєфу є відносно помірними.

Підхід 2: спочатку профілювання, потім мікрорельєф [72].

Друга схема передбачає спочатку формування просторового профілю фальцювальної планки із заданою геометрією крайок і кутів згину, а вже потім – нанесення зміцнювальних мікрорельєфних напрямних на робочій поверхні профільованої деталі. У цьому випадку деформаційні операції виконуються до формування зміцненого шару, тому ризик руйнування або спотворення мікрорельєфу суттєво зменшується [72].

Переваги такого підходу:

- збереження цілісності мікрорельєфу протягом усього експлуатаційного циклу, оскільки після його формування профіль планки вже не зазнає значних деформацій;
- можливість цілеспрямовано керувати орієнтацією та кроком мікрорельєфних напрямних відповідно до локальної геометрії контакту з клапаном обкладинки (зони підвищеного тиску, переходи радіусів тощо);

- краща відтворюваність геометричних параметрів мікрорельєфу, що важливо для подальшої ідентифікації закономірностей «мікрорельєф – тертя – знос» у математичних моделях розділу 3;

- зменшення ризику дефектів типу відшарування, мікротріщин і локальних концентраторів напружень у зміцненому шарі.

Основний недолік цієї схеми – підвищені вимоги до обладнання й оснастки, здатних забезпечити формування мікрорельєфу на складних просторових поверхнях. Це потребує додаткових інвестицій, але водночас розширює можливості інтеграції різних методів зміцнення (ППД, індентування, лазерне текстурування) без шкоди для вже сформованого профілю [72].

З економічної позиції підхід «профілювання → мікрорельєф» є більш затратним на етапі впровадження, проте забезпечує нижчі довгострокові витрати завдяки:

- збільшенню ресурсу роботи планок;
- зменшенню частоти їх заміни та обсягу браку обкладинок;
- стабілізації якості фальцювання в усьому діапазоні форматів і матеріалів.

Порівняння двох технологічних схем показує [72], що:

- перша схема («мікрорельєф → профілювання») технологічно простіша, але супроводжується підвищеним ризиком дефектів мікрорельєфу під час деформації, що погіршує керованість тертям і зносом у зоні контакту;

- друга схема («профілювання → мікрорельєф») потребує складнішого оснащення, проте забезпечує кращу збереженість зміцненого шару, більш однорідний розподіл тиску та напружень, а отже – вищу якість фальцювання інтегральних обкладинок і більшу довговічність планок [72].

У сукупності результати аналізу дозволяють вважати другий підхід пріоритетним для задач цієї дисертації. Саме він створює передумови для побудови узагальненої технологічної схеми, у якій вибір профілю, послідовність і спосіб формування мікрорельєфних напрямних розглядаються

як взаємопов'язані керовані фактори. Ця схема надалі конкретизується в механіко-математичних моделях розділу 3, де оцінюються напружено-деформований стан профільних планок, збереженість мікрорельєфу та їхній вплив на якість фальцювання інтегральних обкладинок.

Висновки до розділу 2

1. Показано, що якість формоутворення інтегральних обкладинок у процесі фальцювання визначається стабільністю контактної взаємодії між картонною розгорткою та профільними фальцювальними планками, оскільки саме ця взаємодія формує геометрію лінії згину, симетрію зведення клапанів і умови подальшого приклеювання крайок.

2. Встановлено, що кінематична нестабільність транспортування розгорток безпосередньо трансформується у характерні поліграфічні дефекти, зокрема перекося клапанів, хвилястість лінії фальца та нерівномірність приклеювання, через зміну часу контакту, асиметрію силового навантаження і нерівномірний розподіл тиску в зоні згину.

3. Обґрунтовано, що сегментне (вибіркове) нанесення клею істотно впливає на процес фальцювання, створюючи локальні зони підвищеної жорсткості та тертя, які призводять до нерівномірного формоутворення, локальних деформацій картону і зростання ймовірності дефектів типу біління, мікротріщин та неповного приклеювання.

4. Показано, що збільшення коефіцієнта тертя та динамічних навантажень у зоні фальцювання, зумовлене наявністю клейових шарів, негативно впливає на повторюваність геометрії обкладинок, що у виробничих умовах проявляється нестабільністю якості тиражу та підвищеною кількістю відбраковки.

5. Систематизовано механізми зношування фальцювальних планок, які опосередковано визначають поліграфічну якість продукції, оскільки деградація робочих поверхонь призводить до зміни умов контакту, росту геометричних відхилень фальца та погіршення стабільності приклеювання клапанів і крайок.

6. Обґрунтовано, що підвищення зносостійкості робочих поверхонь фальцювальних планок є не лише інженерним, а й технологічно-поліграфічним завданням, спрямованим на забезпечення сталої геометрії

фальца, прогнозованої якості зведення елементів обкладинки та зменшення варіабельності показників у межах тиражу.

7. Показано перспективність застосування зміцнювальних мікрорельєфних напрямних як засобу стабілізації формоутворення інтегральних обкладинок, оскільки мікрорельєф дозволяє вирівняти контактний тиск, стабілізувати тертя та зменшити локальні пікові навантаження, що безпосередньо сприяє зниженню кількості геометричних і структурних дефектів.

8. Встановлено, що удосконалення фальцювального механізму та фальцювальних планок створює передумови для підвищення експлуатаційної надійності інтегральних обкладинок, зокрема за рахунок стабільнішого приклеювання, збереження зовнішнього вигляду лінії фальца та зменшення ризику дефектів у процесі подальшої експлуатації.

РОЗДІЛ 3.

МАТЕМАТИЧНЕ ТА ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ДЕФОРМУВАННЯ ТА ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ФАЛЬЦАПАРАТУ ЛІНІЇ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ОБКЛАДИНОК

3.1. Математичне та чисельне моделювання деформацій профільних фальцювальних планок з мікрорельєфним зміцненням та розгортка інтегральних обкладинок

3.1.1. Теоретичні передумови та вихідні рівняння математичного моделювання

Експлуатаційні властивості профільних фальцювальних планок з корозійностійкої сталі визначаються поєднанням трьох груп факторів: геометрією просторового профілю планки, параметрами зміцненого мікрорельєфного шару на робочій поверхні та характером напружено-деформованого стану під час формоутворення профілю і подальшого фальцювання інтегральних обкладинок. Виявлені у розділі 2 дефекти мікрорельєфу пов'язані насамперед з локальними концентраціями напружень у приповерхневому шарі, що виникають під час просторового вигину планки. Тому для обґрунтованого вибору послідовності формування профілю та поверхневого зміцнення необхідно розглядати планку як композитний елемент типу «основа – зміцнений шар» з просторово змінною кривиною.

У подальшому профільна фальцювальна планка моделюється у вигляді балки прямокутного перерізу довжиною L , шириною b та загальною товщиною h , на поверхні якої сформовано зміцнений шар товщиною h_s . Деформування такої балки описується в рамках теорії згину з урахуванням зсувних деформацій. Нормальні та дотичні напруження пов'язуються з відповідними деформаціями співвідношеннями типу

$$\sigma_x = E \varepsilon_x, \quad (3.1.1)$$

$$\tau_{xz} = G \gamma_{xz}, \quad (3.1.2)$$

де E – модуль пружності при розтягу/стиску; G – модуль зсуву; ε_x та γ_{xz} – нормальна та зсувна деформації відповідно.

Крива вісь планки описується переміщеннями $u(x)$ уздовж осі та прогином $w(x)$ у напрямку вигину. Для малих деформацій нормальна деформація волокон, віддалених від нейтральної осі на відстань z , задається виразом

$$\varepsilon_x(x, z) = \varepsilon_0(x) - z\kappa(x), \quad (3.1.3)$$

де ε_x – поздовжня деформація нейтральної осі, а $\kappa(x)$ – її кривина, яка пов'язується з прогином $w(x)$ стандартним співвідношенням

$$\kappa(x) = \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \quad (3.1.4)$$

Згинальний момент $M(x)$ та поперечна сила $Q(x)$ визначаються інтегруванням напружень по площі перерізу. Для балки з еквівалентною жорсткістю на згин EI_{eq} отримується класичний зв'язок

$$M(x) = EI_{eq}\kappa(x), \quad (3.1.5)$$

де еквівалентний момент інерції EI_{eq} для композитної структури «основа – зміцнений шар» подають у вигляді

$$EI_{eq} = E_0 I_0 + E_s \Delta I_s, \quad (3.1.6)$$

де I_0 – момент інерції незміцненої основи, ΔI_s – додатковий внесок від зміцненого шару, E_0 та E_s – модулі пружності основи та зміцненого шару відповідно.

Просторове профілювання фальцювальної планки супроводжується не лише згином, а й закручуванням перерізу вздовж довжини. Для опису цього ефекту вводиться функція $\alpha(x)$, що задає кут повороту перерізу навколо поздовжньої осі. Тоді повний деформаційний стан елемента розглядається як поєднання згину та крутіння, а вигинальний момент $M(x)$ та крутильний момент $T(x)$ пов'язуються з кривиною $\kappa(x)$ і кутовою деформацією $\theta(x)$ співвідношеннями типу

$$M(x) = EI_{eq} \kappa(x), \quad T(x) = GJ_{eq} \theta(x), \quad (3.1.7)$$

де J_{eq} – еквівалентний полярний момент інерції перерізу.

З урахуванням розподіленого навантаження $q(x)$, що моделює контактні сили у зоні взаємодії «планка – клапан обкладинки», записують систему рівнянь рівноваги для згину та крутіння. Сукупність отриманих співвідношень утворює вихідну систему для математичного моделювання напружено-деформованого стану профільних фальцювальних планок зі зміцненим мікрорельєфним шаром. У наступних підрозділах ці рівняння конкретизуються для характерних схем навантаження й граничних умов та використовуються для побудови числових моделей (метод скінченних елементів) і аналізу впливу параметрів зміцнення на збереженість мікрорельєфу та довговічність планок.

3.1.2. Чисельне моделювання і оптимізація процесів фальцювання та обробки матеріалів для виготовлення інтегральних обкладинок

Розвиток чисельних методів аналізу, зокрема методу скінченних елементів (FEM), суттєво розширив можливості дослідження деформування багатошарових матеріалів, що застосовуються у виробництві інтегральних обкладинок. На відміну від аналітичних підходів, FEM дозволяє враховувати реальну геометрію виробу, шарувату структуру, анізотропію та нелінійність механічних властивостей, а також складні режими навантаження, що виникають під час фальцювання, бігування і склеювання, що зумовлює його використання як базового інструменту моделювання в даній роботі [83].

У роботах [73–74, 83] запропоновано моделі механічної поведінки картону при згинанні та фальцюванні, які враховують локальну зміну жорсткості, перехід до пружно-пластичного стану та ризик утворення тріщин і розшарувань. Ці підходи покладено в основу вибору критеріїв граничних деформацій у чисельній моделі інтегральної обкладинки [83].

Поєднання експериментальних випробувань із чисельним моделюванням, розглянуте в [75–76, 83], дозволяє коректно ідентифікувати

параметри матеріальних моделей для волокнистих матеріалів, зокрема в умовах локалізованих деформацій у зоні згину та приклеювання клапанів. Аналогічна логіка використовується в цій дисертації для калібрування властивостей картону хром-ерзац і валідації результатів FEM-розрахунків [83].

У працях [77–79, 83] FEM застосовано для аналізу точності формування фальців і надійності клеєних з'єднань, що дає змогу виявляти критичні зони перевантаження та оптимізувати параметри згину й геометрію розгортки. У даній роботі ці підходи адаптовано до умов інтегральних обкладинок із двошаровою структурою та взаємодією з профільними фальцювальними планками [83].

Моделювання багатошарових матеріалів із клеєвими та полімерними прошарками, представлене в [80–82, 83], створює методологічне підґрунтя для представлення інтегральної обкладинки як системи «паперова основа – клейовий прошарок – покривний шар» та урахування їхнього спільного впливу на жорсткість і деформаційну поведінку [83].

Разом з тим, аналіз літературних джерел свідчить, що специфіка фальцювання інтегральних обкладинок за умов високих швидкостей, наявності локальних клейових зон та взаємодії з профільними планками зі зміцненим мікрорельєфом залишається недостатньо дослідженою. Це обумовлює необхідність розроблення адаптованих чисельних моделей і критеріїв працездатності, що й визначає зміст наступних підрозділів дисертації.

3.1.3. Удосконалення чисельної моделі деформацій розгортки інтегральних обкладинок під час фальцювання

Коректне прогнозування деформацій інтегральних обкладинок під час фальцювання потребує урахування варіативності механічних властивостей картону, впливу режимів фальцювання, взаємодії з процесами бігування та приклеювання клапанів, а також обмежень наявних чисельних моделей і

обчислювальної складності. Для систематизації цих чинників у табл. 3.1.1 виділено основні «проблемні орієнтації», які визначають вимоги до побудови та оптимізації чисельного аналізу: варіативність властивостей матеріалів, вплив динамічних режимів, складність геометрії та контактної взаємодії, обмеження спрощених моделей, необхідність інтеграції сучасних вимірювальних технологій та машинного навчання, обчислювальні витрати та забезпечення практичної придатності результатів [83].

Таблиця 3.1.1.

Проблемні орієнтації для моделі оптимізації чисельного аналізу [83]

№	Проблемна орієнтація	Опис
1	Варіативність механічних властивостей матеріалів	Гетерогенність матеріалів та анізотропія механічних властивостей ускладнюють моделювання.
2	Вплив процесу фальцювання	Динамічні умови та змінні виробничі параметри впливають на точність прогнозування.
3	Взаємодія з іншими процесами	Складні геометричні форми, адгезія та тертя ускладнюють врахування взаємодії матеріалів.
4	Обмеження наявних чисельних моделей	Спрощені припущення та неповне охоплення умов експлуатації обмежують точність моделей.
5	Інтеграція сучасних технологій	Інтеграція машинного навчання та високоточних вимірювальних технологій потребує ресурсів та знань.
6	Обчислювальна складність та ефективність	Збільшення точності методів призводить до зростання обчислювальних витрат, необхідна оптимізація.
7	Практичне застосування результатів	Валідація та калібрування моделей, застосування результатів для оптимізації виробництва.
8	Комплексність багатофакторного аналізу	Врахування взаємозалежностей факторів, проведення аналізу чутливості потребує додаткових ресурсів.

Для формалізації задачі прогнозування вводяться такі основні величини [83]: ϵ – відносна деформація матеріалу обкладинки; σ_y – межа плинності матеріалу обкладинки (Па); F – прикладена сила під час фальцювання (Н); S –

площа поперечного перерізу матеріалу обкладинки (мм^2); E – модуль пружності матеріалу обкладинки (Па); P_d – ймовірність виникнення деформацій та пошкоджень матеріалу обкладинки; k – коефіцієнт безпеки (враховує фактори ризику і можливі похибки) [83].

Напруження в матеріалі обкладинки визначається як

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (3.1.8)$$

а при пружній роботі матеріалу виконується співвідношення

$$\sigma = E\varepsilon. \quad (3.1.9)$$

Умова настання небажаних деформацій або пошкоджень формулюється у вигляді критерію перевищення розрахункового напруження над межею плинності σ_y .

Для урахування варіативності режимів фальцювання та властивостей матеріалів використано ймовірнісний підхід. Безпечна робота системи описується коефіцієнтом безпеки

$$k = \frac{\sigma_y}{\sigma}, \quad (3.1.10)$$

а ймовірність виникнення пошкоджень P_d пов'язується з розподілом випадкових величин, що характеризують силу F та граничну силу руйнування $F_{max} = \sigma_y S$. За припущення нормального розподілу цих величин ймовірність перевищення навантаженням граничного рівня може бути обчислена через стандартні функції нормального закону. Це дозволяє інтерпретувати P_d як цільовий показник для оцінювання надійності процесу фальцювання [83].

Для практичного застосування ймовірнісної моделі у табл. 3.1.2 [83] наведено основні типи деформацій та пошкоджень інтегральних обкладинок (згинання, зморщування, мікротріщини, розриви, відшарування клапанів, відколи поверхні) з орієнтовними значеннями ймовірностей їх виникнення та типовими причинами. Така систематизація забезпечує зв'язок між абстрактним показником P_d і конкретними технологічними дефектами, що

полегшує використання моделі для діагностики та оптимізації режимів фальцювання [83].

Таблиця 3.1.2.

Систематизація ймовірностей виникнення деформацій та пошкоджень інтегральних обкладинок під час фальцювання

№	Тип деформації (пошкодження)	Ймовірність	Причини
1	Згинання та зморщування	Висока	Помилкове налаштування фальцювальної машини, неякісний матеріал
2	Розтягнення або стиснення країв	Середня	Неточне позиціонування обкладинки під час приклеювання
3	Мікротріщини	Низька	Надмірне механічне навантаження
4	Розриви обкладинки	Низька	Надмірне натягнення, дефекти матеріалу
5	Відшарування клапанів	Середня	Недостатня адгезія, неякісний клей
6	Відколи та здирання поверхні	Низька	Надмірний тиск, збій обладнання

Подальший розвиток підходу пов'язано з постановкою задачі оптимізації. Функція цілі формулюється як мінімізація максимальної деформації або напруження в матеріалі обкладинки під час фальцювання, а також мінімізація ймовірності пошкоджень P_d . Вектор змінних включає геометричні параметри (радіуси згину, довжини клапанів, товщину шарів), параметри профілю фальцювальних планок та режимні параметри машини (швидкість, зусилля притиску тощо). Зв'язок між напруженнями та переміщеннями задається системою рівнянь рівноваги, дискретизованою методом скінченних елементів.

Для розв'язання задачі застосовано градієнтні методи оптимізації, доповнені методом Ньютона–Рафсона [84] для нелінійних постановок. На кожній ітерації виконується FEM-розрахунок напружено-деформованого стану, обчислюються значення функції цілі та її градієнта, після чого параметри коригуються у напрямку зменшення цільового показника. Критеріями завершення служать досягнення заданих порогових значень

максимальної деформації, стабілізація розподілу напружень у контрольних зонах та зниження ймовірності пошкоджень до прийняттого рівня.

Запропонована схема створює узгоджений перехід від оцінки деформацій за допомогою FEM-моделі до практичних рекомендацій щодо налаштування процесу фальцювання та вибору конструкційно-технологічних параметрів для виготовлення інтегральних обкладинок.

3.1.4. Моделювання фальцювання інтегральних обкладинок методом скінченних елементів із використанням відеоекстензометрії

Для проведення детального розрахунку моделі оптимізації чисельного аналізу з метою прогнозування деформацій інтегральних обкладинок під час фальцювання, використано метод скінченних елементів (FEM) для аналізу напружено-деформованого стану прямокутної пластини з картону хром-ерзац.

На рис. 3.1.1 показано фрагмент сітки скінченних елементів, яка використовується для дискретизації області деформації розгортки інтегральної обкладинки та подальшого чисельного аналізу. Ця сітка дозволяє детально оцінювати напружено-деформований стан обкладинки під час фальцювання [83].

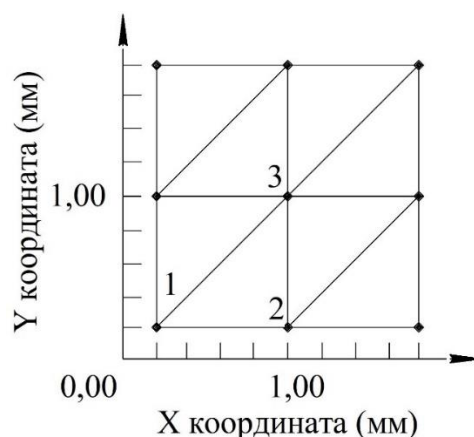


Рис. 3.1.1. Фрагмент сітки скінчених елементів:

1, 2, 3 – вузли трикутного елемента

Точками позначено вузли сітки, де обчислюються значення деформацій та напружень, а лініями показано ребра трикутних елементів, що утворюють

сітку скінченних елементів. Така дискретизація забезпечує високу точність моделювання, дозволяючи виявляти локальні ефекти і концентрації напружень, що можуть виникати під час технологічного процесу фальцювання обкладинок [83].

Враховано задані габаритні розміри прямокутного фрагмента розгортки обкладинки, матеріальні властивості картону та умови навантаження. Розміри фрагмента: ширина $b = 0.2$ м, довжина $L = 0.3$ м, товщина $t = 1$ мм. Матеріальні властивості: модуль Юнга $E = 2$ ГПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.3$. Умови навантаження: рівномірно розподілене навантаження $q = 100$ Н/м [83].

На рис. 3.1.2. представлено схему дискретизації розгортки інтегральної обкладинки. Ця схема відображає контурну геометрію обкладинки, а також нанесену сітку елементів, яка використовується для чисельного аналізу методом скінченних елементів (FEM). Сітка забезпечує точне подання геометрії обкладинки, дозволяючи розраховувати напружено-деформований стан під час процесів фальцювання та навантаження. Кожен елемент сітки представляє невеликий фрагмент обкладинки, що дозволяє детально аналізувати поведінку матеріалу і прогнозувати можливі деформації та пошкодження [83].

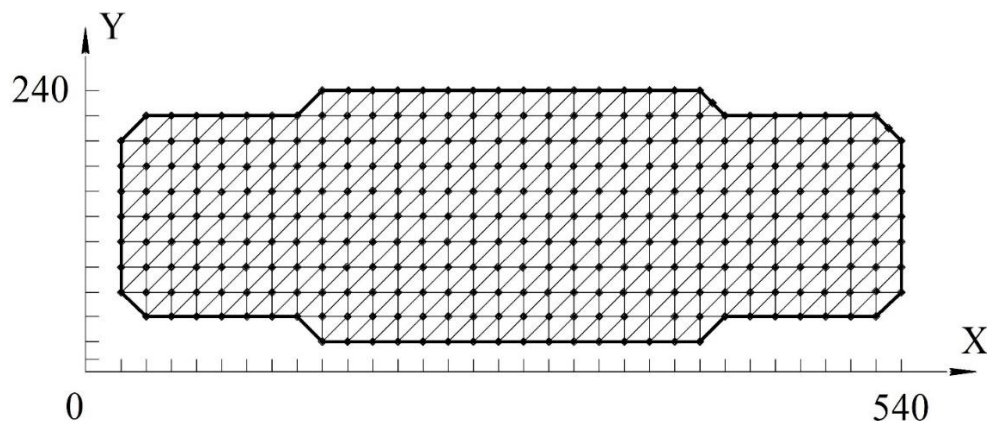


Рис. 3.1.2. Сітка скінченних елементів на розгортці інтегральної обкладинки

На наступному етапі проводиться побудова та визначення локальної матриці жорсткості для кожного скінченного елемента, враховуючи його геометричні параметри та матеріальні властивості [83].

Матеріальні властивості: модуль Юнга $E=2\text{ГПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu=0.3$, товщина фрагмента розгортки $t=1\times 10^{-3}\text{ м}$.

Координати вузлів трикутного елемента (рис. 1):

- Вузол 1: (0,0)
- Вузол 2: (1,0)
- Вузол 3: (0,1)

Площу S трикутника обчислено за формулою:

$$S = \frac{1}{2} |x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)| \quad (3.1.11)$$

На рис. 3.1.3 представлено візуальне відтворення локальної матриці жорсткості, сформоване за допомогою програми MATLAB. Ця матриця була обчислена на основі отриманих результатів для трикутного елемента розгортки інтегральної обкладинки [83].

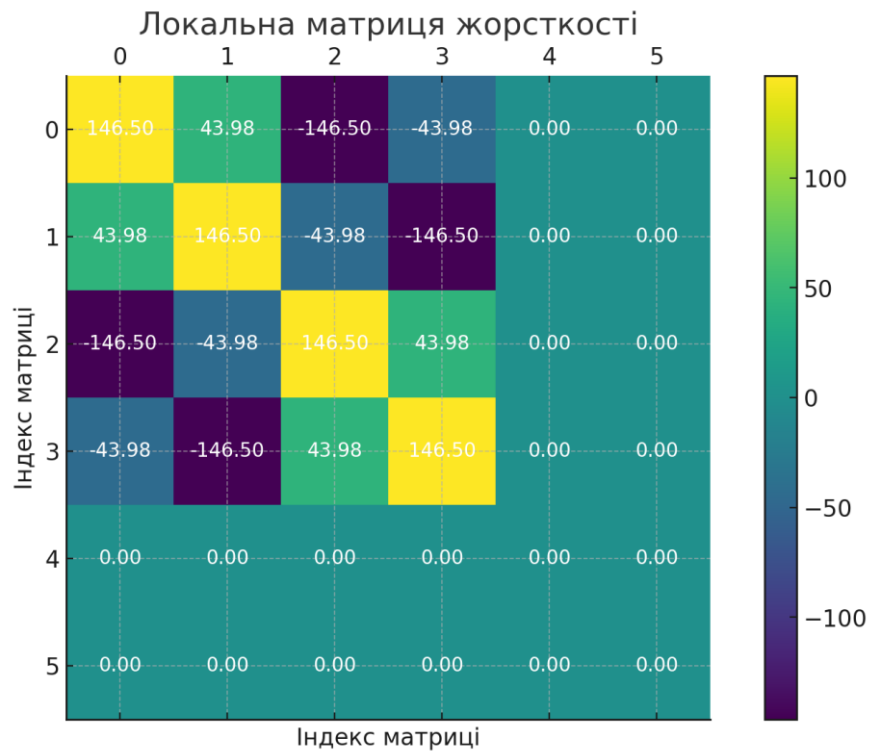


Рис. 3.1.3. Візуальне відтворення локальної матриці жорсткості для трикутного елемента обчислене за отриманими результатами [83].

Елементи матриці жорсткості відображають значення жорсткості для кожної пари вузлів (рядок і стовпець). Кольорова шкала ілюструє ці значення,

де темніші кольори представляють вищі значення жорсткості. Індеси в матриці відповідають конкретним вузлам елемента. Діагональні елементи матриці вказують на жорсткість кожного вузла елемента по окремих напрямках, демонструючи опір матеріалу (картону хром-ерзац) до деформації. Позадіагональні елементи відображають взаємодію між різними вузлами елемента. Ці значення можуть бути негативними, що вказує на напрямки і величину взаємодіючих сил [83].

Для об'єднання локальних матриць жорсткості в одну глобальну матрицю жорсткості системи для всієї розгортки інтегральної обкладинки необхідно врахувати вплив кожного елемента на всю конструкцію. Це включає додавання відповідних елементів локальних матриць жорсткості до глобальної матриці, забезпечуючи таким чином узгоджене врахування взаємодії між вузлами. На рис. 3.1.4 представлено глобальну матрицю жорсткості, сформовану за допомогою програми MATLAB [83].

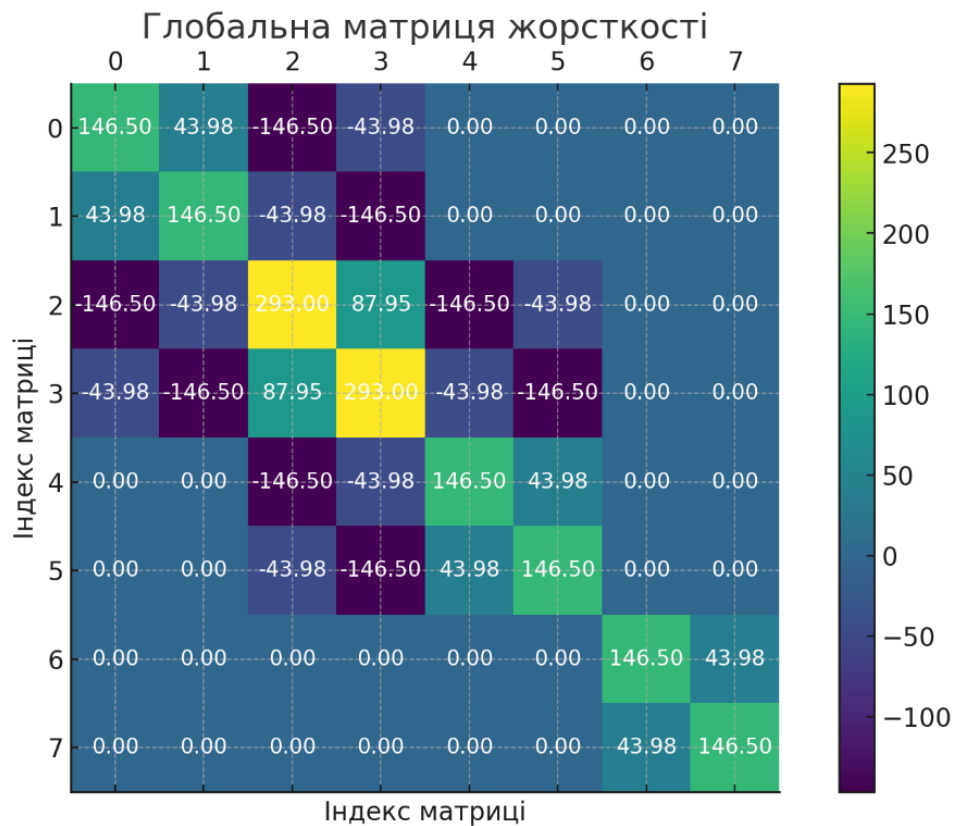


Рис. 3.1.4. Глобальна матриця жорсткості для системи трикутних елементів розгортки інтегральної обкладинки [83].

Ця матриця відображає сукупний вплив усіх елементів конструкції, що дозволяє детально аналізувати напружено-деформований стан всієї обкладинки під час фальцювання та навантаження. На наступному етапі для безконтактного вимірювання переміщень клапанів розгортки інтегральних обкладинок, що виникає під час швидкісного технологічного фальцювання, використано метод відеоекстензометрії [83].

Цей метод дозволяє отримати точні дані про переміщення ділянок клапанів в реальному часі без необхідності фізичного контакту з об'єктом, що виключає можливість впливу вимірювальних приладів на результати вимірювань [83].

Для підготовки до тестування на клапани розгортки інтегральних обкладинок нанесено мітки, які слугуватимуть референсними точками для вимірювань, а також визначено початкові координати цих точок. Досліджуваний об'єкт піддано навантаженню, що виникає в процесі фальцювання клапанів розгортки обкладинок профільними фальцювальними планками, який записано відеокамерою у режимі реального часу [83].

Відеозапис зафіксував зміну положення референсних точок на поверхні об'єкта, а їх подальший аналіз здійснено за допомогою програмного забезпечення [83].

Використовуючи програму Vic-3D (Correlated Solutions Inc., USA), розраховано переміщення ділянок об'єкта на основі зміни їхніх координат та створено діаграми, які показують розподіл кінематичного переміщення у досліджуваному об'єкті [83].

Це дозволило виявити в структурі матеріалу клапана розгортки обкладинки області з найбільшими переміщеннями під час фальцювання. На рис. 3.1.5 наведено схеми кінематичного поля переміщення для прямокутного фрагмента ділянки клапана розгортки інтегральної обкладинки із картону хром-ерзац [83].

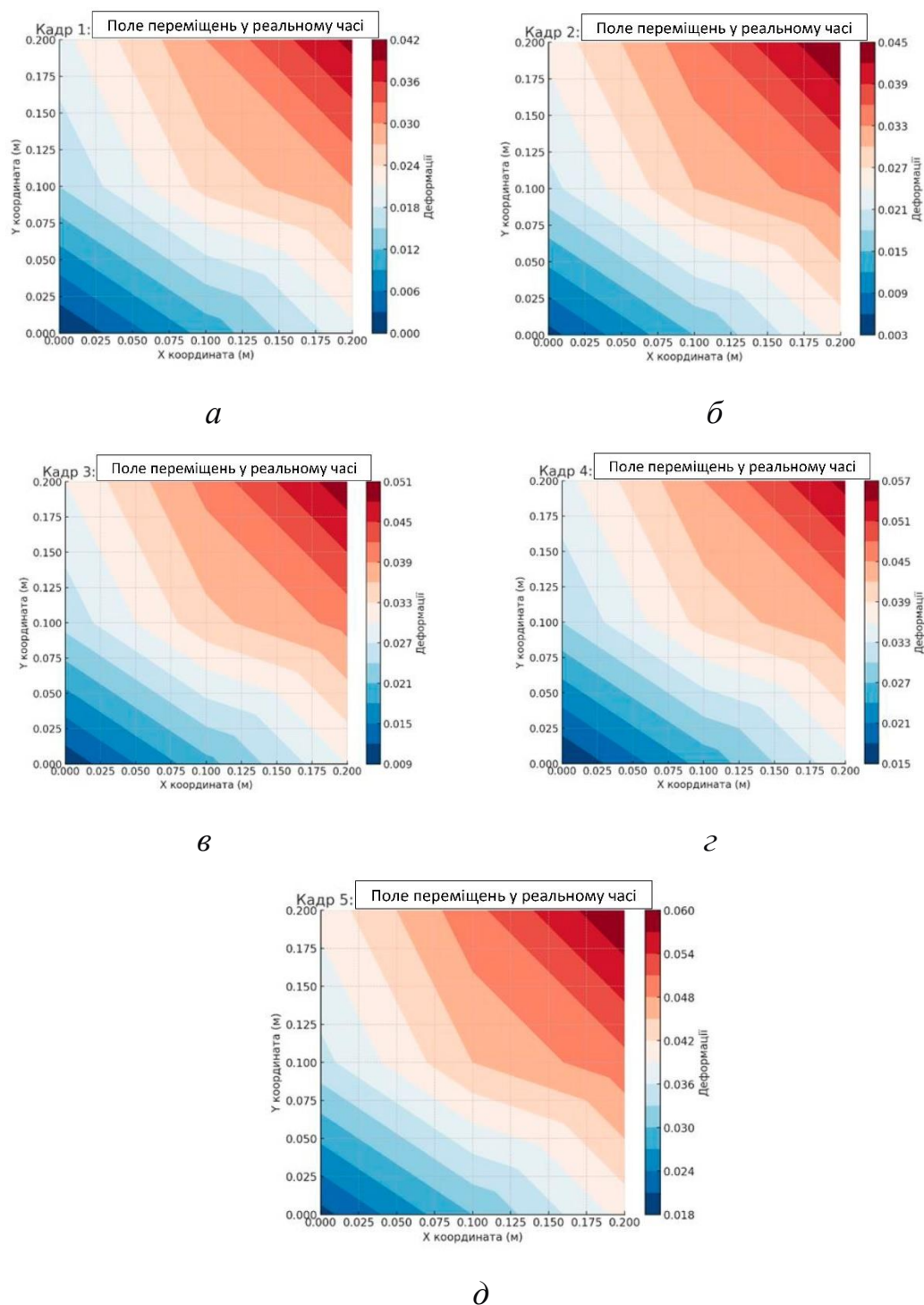


Рис. 3.1.5. Послідовність кадрів формування поля кінематичного переміщення клапанів інтегральної обкладинки в режимі реального часу: *a* – початковий стан поля переміщень; *б* – зміна кінематичних параметрів після одного дискретного інтервалу; *в* – розвиток поля переміщень після двох інтервалів; *г* – стан після трьох кроків дискретизації; *д* – кінематичний розподіл переміщень після чотирьох інтервалів [83].

Ця візуалізація показує перміщення поверхні клапана розгортки, використовуючи кольорові карти для різних рівнів кінематичних деформацій. Кольорові карти на зображеннях (рис. 3.1.5) відображають розподіл кінематичних переміщень у вузлах розрахункової моделі. Темніші відтінки відповідають більшим значенням переміщень, тоді як світліші – меншим [83]

Координатна сітка відображає положення вузлів у площині, що дає змогу простежити зміну поля переміщень по поверхні клапанів обкладинки. Таким чином, наведені результати характеризують кінематичну поведінку ділянок клапанів інтегральних обкладинок у процесі формоутворення [83].

На основі проведених досліджень встановлено, що використання методу кінцевих елементів для чисельного аналізу кінематичних переміщень розгорток обкладинок під час фальцювання забезпечує високу точність прогнозування та ефективність моделювання. Застосування сучасних технологій, таких як відеоекстензометрія, дозволяє досягти більш детального розуміння поведінки матеріалів у виробничих умовах. Результати експериментів підтвердили ефективність розробленої чисельної моделі, яка демонструє високу кореляцію з даними, отриманими під час фізичних випробувань. Це дослідження відкриває нові перспективи для оптимізації технологічних процесів у поліграфічній галузі, забезпечуючи покращення якості книжкової продукції та зниження ризиків виникнення дефектів [83].

3.2. Дослідження впливу геометрії профілю та мікрорельєфного зміцнення на зносостійкість фальцювальних планок

3.2.1. Постановка задачі моделювання зносостійкості фальцювальних планок

Зносостійкість фальцювальних планок є пріоритетним чинником, що визначає стабільність геометрії фальца, якість формування інтегральних обкладинок і ресурс роботи фальцапарату. У процесі фальцювання робочі поверхні планок багаторазово контактують із клапанами розгорток, вкритими клеєм, під дією нормальних та тангенціальних навантажень. Це призводить до

розвитку комбінованого механізму зношування, який включає абразивний, адгезійний та фретинговий компоненти. Додатково на перебіг процесу впливають температура у зоні контакту, мікрогеометрія робочої поверхні, властивості клейового шару та жорсткість картону, що зумовлює необхідність побудови математичної моделі, яка:

- описує зв'язок між силовими та кінематичними параметрами процесу фальцювання і швидкістю зношування поверхневого шару планок;
- дозволяє порівнювати різні варіанти геометрії профілю та мікрорельєфного зміцнення;
- придатна для подальшої оптимізації технологічних параметрів з урахуванням обмежень на напружено-деформований стан.

Як базовий підхід використано модифікований закон Арчарда [15], у якому інтенсивність зносу розглядають як функцію нормального навантаження, шляху ковзання, коефіцієнта тертя, твердості матеріалу та параметрів мікрорельєфу. Узагальнено інтегрований показник зносу Z подається у вигляді

$$Z = F(p, s, \mu, H, R_a, T) \quad (3.2.1)$$

де p – середній контактний тиск, s – шлях ковзання, μ – коефіцієнт тертя, H – твердість матеріалу планки, R_a – параметр шорсткості / мікрорельєфу, T – температура в зоні контакту.

Подальші підрозділи розвивають цю постановку, конкретизуючи вигляд функції $F(\cdot)$, ураховуючи температурну залежність твердості та вплив мікрорельєфних напрямних на розподіл напружень і тертя. Це створює підґрунтя для кількісного порівняння різних варіантів конструкції та технології зміцнення фальцювальних планок.

3.2.2. Комбіновані методи зміцнення фальцювальних планок та оцінка їх придатності для виготовлення інтегральних обкладинок

Аналіз сучасних підходів до підвищення зносостійкості робочих поверхонь показує, що найбільш перспективними є технології поверхневого зміцнення з контрольованою мікроструктурою та мікрорельєфом. До них належать наплавлення твердих сплавів, лазерне й плазмове наплавлення, ультразвукова обробка, комбіновані лазерно-ультразвукові методи, оптимізована термічна обробка та мікрорельєфне зміцнення [85–94, 95]. Результати цих досліджень слугують науковим підґрунтям для вибору технології зміцнення фальцювальних планок фальцапарату лінії для виготовлення інтегральних обкладинок [95].

Показано, що наплавлення твердих сплавів із підвищеним вмістом легуючих елементів дає змогу істотно збільшити твердість і зносостійкість поверхневих шарів, проте такі технології орієнтовані переважно на масивні деталі й потребують значних тепловкладень. Для тонких профільних елементів зі складною геометрією, якими є фальцювальні планки, це обмежує їх застосування через ризик деформацій і втрати точності профілю [95].

Ультразвукові методи поверхневого зміцнення, зокрема багатоточкова й ударна обробка, забезпечують формування більш однорідного мікрорельєфу, зниження пористості й залишкових напружень, підвищення твердості та стійкості до втомного руйнування [85–88, 95].

Комбіновані технології, що поєднують лазерне загартування з ультразвуковою обробкою, демонструють синергетичний ефект: формування глибшого зміцненого шару з дрібнозернистою мікроструктурою та підвищеним опором абразивному зносу [89–94, 95]. Оптимізована термічна обробка сталей використовується як базовий етап для отримання необхідного рівня твердості й зниження внутрішніх напружень, але сама по собі не забезпечує формування керованого мікрорельєфу, потрібного для стабілізації тертя в зоні фальцювання [95].

Особливий інтерес для завдання дисертації становлять методи мікрорельєфного зміцнення поверхонь. Вони дають змогу цілеспрямовано формувати мікрорельєф із заданими геометричними параметрами,

зменшувати ефективну площу контакту, перерозподіляти напруження та знижувати ймовірність локальних концентрацій. Оптимізація геометрії мікрорельєфу з механічними властивостями зміцненого шару істотно підвищує довговічність деталей в умовах інтенсивного механічного зносу [95].

3.2.3. Порівняльний аналіз конструктивних особливостей фальцювальних планок

Як показано в підрозділах 3.2.1 і 3.2.2, вибір конструкції фальцювальних планок та параметрів мікрорельєфного зміцнення істотно впливає на довговічність робочих поверхонь і стабільність процесу фальцювання інтегральних обкладинок. Для подальшого аналізу розглянуто два конструктивні варіанти профільних планок: з осьовим вигином на кут 90° (рис. 3.2.1) [95] та з профілем, сформованим за евольвентною кривою (рис. 3.2.2) [95].

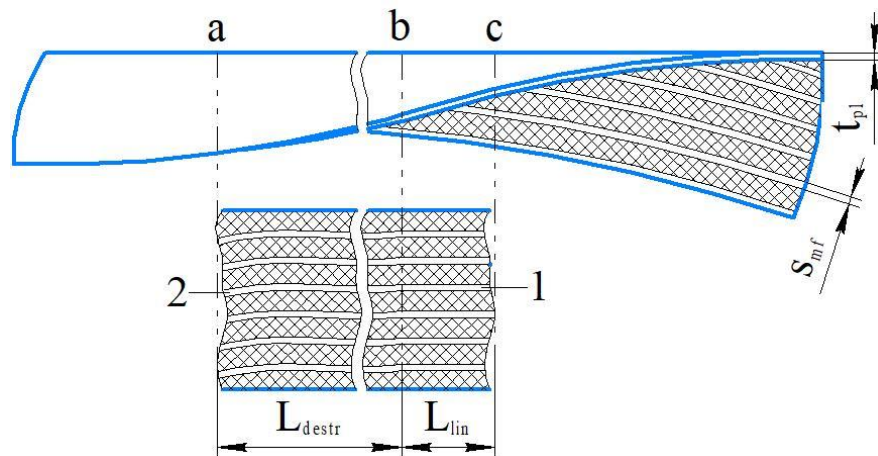


Рис. 3.2.1. Фальцювальна профільна планка з осьовим вигином на кут 90° :

1 – мікрорельєфні напрямні без руйнівних дефектів; 2 – мікрорельєфні напрямні з руйнівними дефектами в місцях осьового вигину; а, b, с – координати січних площин; L_{lin} – перехідна розмірна зона без руйнівних дефектів; L_{destr} – розмірна зона виникнення осьових дефектів; t_{pl} – товщина планки; s_{mf} – ширина мікрорельєфних напрямних [95]

Фальцювальні планки з осьовим вигином на 90° є конструктивно простішими й технологічно доступними. Вони забезпечують виконання базових операцій фальцювання та можуть успішно застосовуватися в умовах стандартних навантажень. Однак локальна зміна кривини в зоні осьового вигину призводить до концентрації напружень у приповерхневому шарі, де сформовано мікрорельєфні напрямні. У цих зонах під дією циклічних навантажень зростає ризик виникнення мікротріщин і пошкодження мікрорельєфу, що скорочує ресурс планок і погіршує якість фальцювання [95].

На рис. 3.2.1 умовно виділено ділянки мікрорельєфу без руйнівних дефектів і з підвищеною ймовірністю пошкодження. Лінійний відрізок, на якому мікрорельєф зберігається без істотних змін, відповідає зоні відносно рівномірного розподілу напружень, тоді як у безпосередній близькості до осьового вигину формується зона зростання напружень вигину і зсуву. Саме в цій зоні відбувається прискорене зношування мікрорельєфних напрямних і накопичення ушкоджень [95].

Евольвентні фальцювальні планки (рис. 3.2.2) мають плавно змінну кривину профілю, що забезпечує поступовий перерозподіл навантаження вздовж кромки [95]

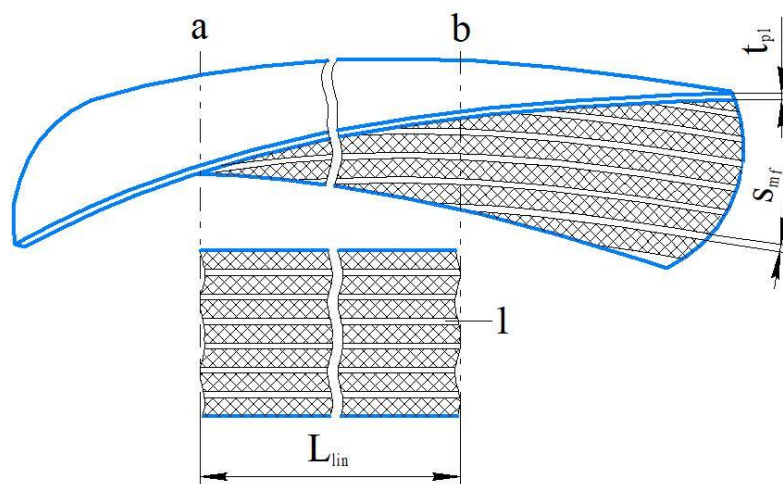


Рис. 3.2.2. Евольвентна фальцювальна планка: 1 – мікрорельєфні напрямні без руйнівних дефектів; a, b – координати січних площин; L_{lin} – перехідна розмірна зона без руйнівних дефектів; t_{pl} – товщина планки; s_{mf} – ширина мікрорельєфних напрямних

У результаті зменшується різкість переходу між зонами різної кривини, а напруження в мікрорельєфному шарі розподіляються рівномірніше. Умовно виділена ділянка L_{lin} характеризує довжину зони, де мікрорельєфні напрямні працюють без виникнення руйнівних дефектів. Для евольвентних планок довжина L_{lin} є більшою, ніж для планок з осьовим вигином, що свідчить про вищу ефективну зносостійкість профілю [95].

На рис. 3.2.2 зображено фальцювальну планку профіль якої утворено евольвентною кривою. Січні площини з вершинами, позначеними буквами а, б, виокремлюють серединну частину пластини, за аналогією з рис. 1, та фіксують незмінність геометрії мікрорельєфних напрямних (поз. 1) від початку планки й до її кінцевої частини без руйнівних дефектів. Лінійна відстань виокремленої зони позначено, як L_{lin} [95].

Хоча виробництво таких планок є складнішим і дорогим, вони забезпечують високу універсальність та точність, особливо важливу для складних фальцювальних завдань. Завдяки цим перевагам, евольвентні планки підходять для високоякісних поліграфічних книжково-журнальних виробів, де точність виготовлення та тривалий термін експлуатації є основними складниками високої ціни завершеного виробу. Порівняльні характеристики фальцювальних планок систематизовано і представлено у таблиці 3.2.1 [95].

Таблиця 3.2.1.

Порівняльні характеристики фальцювальних пластин

Характеристика	Фальцювальна планка з осьовим вигином на 90°	Евольвентна фальцювальна планка
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	Пристосовується до різних схем і вирівнювань
Точність	Може бути непридатною для точних вимог	Забезпечує високу точність у фальцюванні

Математичний опис напружено-деформованого стану евольвентних фальцювальних планок базується на параметричному заданні профілю та рівняннях теорії пружності. Профіль робочої кромки задається евольвентною кривою у параметричній формі (3.2.2), (3.2.3), що дає змогу врахувати змінну кривину вздовж довжини планки та пов'язати геометричні параметри профілю з локальними значеннями радіуса кривини [95].

$$x(\theta) = R(\sin(\theta) + \theta(\cos(\theta)), \quad (3.2.2)$$

$$y(\theta) = R(\cos(\theta) - \theta(\sin(\theta)), \quad (3.2.3)$$

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

Для опису напружень у тілі планки використано тензор напружень σ_{ij} (3.2.3) та рівняння рівноваги в нелінійній постановці (3.2.4), які забезпечують зв'язок між зовнішніми навантаженнями, що виникають у процесі фальцювання, та внутрішнім напруженим станом у приповерхневому шарі [95].

$$\sigma_{ij} = E\varepsilon_{ij} \quad (3.2.4)$$

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

$$\sigma_{\theta} = \frac{F}{2\pi Rt} \quad (3.2.5)$$

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

Рівняння сумісності деформацій і конститутивні співвідношення (3.2.6)–(3.2.10) дають змогу пов'язати компоненти тензорів напружень і деформацій з урахуванням матеріальних характеристик сталі фальцювальної планки [95].

$$\sigma_{\max} = K_t \sigma_0 \quad (3.2.6)$$

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: $\sigma_{\max} \approx 3\sigma_0$

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta u_i}{\delta x_j} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i} + \frac{\delta u_k}{\delta x_i} \frac{\delta u_k}{\delta x_j} \right) \quad (3.2.7)$$

де:

u_i, u_j, u_k – компоненти вектору переміщень в напрямках x_i, x_j, x_k відповідно, x_i, x_j, x_k – координати у відповідних напрямках.

$$\text{Тангенціальна деформація } \varepsilon_{xx} = \frac{\delta u_x}{\delta x} = \frac{\delta x(\theta)}{\delta \theta} \frac{\delta \theta}{\delta x} \quad (3.2.8)$$

$$\text{Нормальна деформація } \varepsilon_{yy} = \frac{\delta u_y}{\delta y} = \frac{\delta y(\theta)}{\delta \theta} \frac{\delta \theta}{\delta y} \quad (3.2.9)$$

$$\text{Зсувна деформація } \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta u_x}{\delta y} + \frac{\delta u_y}{\delta x} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta x(\theta)}{\delta \theta} \frac{\delta \theta}{\delta x} + \frac{\delta y(\theta)}{\delta \theta} \frac{\delta \theta}{\delta y} \right) \quad (3.2.10)$$

Застосування такого підходу дозволяє кількісно оцінити розподіл нормальних і дотичних напружень у зоні мікрорельєфного шару для різних варіантів геометрії профілю. Порівняння результатів розрахунків для планок з осьовим вигином на 90° та евольвентних планок показує, що останні забезпечують більш плавну зміну кривини та нижчі пікові значення напружень у приповерхневому шарі. Це узгоджується з результатами експериментального та чисельного аналізу, наведеними вище, і підтверджує вищу зносостійкість евольвентних фальцювальних планок з мікрорельєфним зміцненням [95].

3.2.4. Моделювання та оптимізація зносостійкості фальцювальних планок: вплив температурних факторів і мікрорельєфних напрямних на довговічність

Забезпечення надійної та тривалої роботи фальцювальних планок вимагає урахування комплексу чинників, що впливають на їх зносостійкість: абразивної дії картону, циклічних контактних навантажень, нагрівання при високошвидкісному фальцюванні, дії клею та продуктів зношування. Поступова деградація поверхневого шару проявляється у зміні твердості, появі

локальних пошкоджень мікрорельєфу та зростанні шорсткості, що врешті призводить до втрати геометричної точності фальца й передчасної заміни планок.

Спираючись на результати підрозділів 3.2.2–3.2.3, де показано вплив геометрії профілю та мікрорельєфного зміцнення на напружено-деформований стан та рівень тертя, у цьому підрозділі побудовано узагальнену математичну модель зносостійкості фальцювальних планок. Як вихідну залежність використано закон Арчарда [15], доповнений температурною залежністю твердості матеріалу та коригувальними коефіцієнтами, що враховують наявність мікрорельєфних напрямних:

$$D = k_w(T, R_a)ps, \quad (3.2.11)$$

де D – міра зносу (лінійна або об’ємна), $k_w(T, R_a)$ – ефективний коефіцієнт зношування, який зменшується при оптимальній орієнтації та параметрах мікрорельєфу; p – середній контактний тиск; s – накопичений шлях ковзання в зоні контакту.

Температурний вплив описується через залежність твердості від температури $H(T)$. Зі зростанням температури твердий поверхневий шар частково втрачає жорсткість, що еквівалентно зростанню коефіцієнта k_w і прискоренню зношування. У моделі це враховується введенням температурного множника

$$k_w(T, R_a) = k_{w0}\varphi_T(T)\varphi_R(R_a), \quad (3.2.12)$$

де k_{w0} – базове значення коефіцієнта зношування при номінальній температурі та шорсткості; φ_T – функція, що описує вплив температури (наприклад, зростання k_w при перевищенні допустимого інтервалу), а $\varphi_R(R_a)$ – функція впливу мікрорельєфу, яка для оптимальних параметрів R_a , глибини й кроку мікроканавок приймає значення менше одиниці [95].

Додатково враховано вплив локальних концентрацій напружень у зоні мікрорельєфного шару. Коефіцієнт концентрації напружень K_t пов’язує локальні максимальні напруження $\sigma_{\max}$ із номінальним напруженням σ_{nom} :

$$\sigma_{max} = K_t \sigma_{nom} \quad (3.2.13)$$

Для простих профілів із різким кутовим згином K_t набуває більших значень, тоді як евольвентні профілі з плавною зміною кривини та раціональною орієнтацією мікрорельєфних напрямних знижують K_t , тим самим обмежуючи локальні піки напружень і уповільнюючи зношування [95].

В межах чисельного аналізу компоненти деформаційного стану (нормальні, тангенціальні та зсувні деформації) у приповерхневому шарі визначаються на основі результатів FEM-розрахунків. Це дозволяє для кожного варіанта геометрії профілю й параметрів мікрорельєфу сформувати поле контактних напружень і на його основі обчислити інтенсивність зносу за заданою кількістю циклів фальцювання. Порівняння результатів для традиційних планок із осьовим вигином на 90° та евольвентних планок з мікрорельєфним зміцненням показує, що останні забезпечують:

- більш рівномірний розподіл напружень у приповерхневому шарі;
- менші значення коефіцієнта концентрації напружень K_t ;
- зниження ефективного коефіцієнта зношування k_w завдяки кращому відведенню продуктів зносу та стабілізації тертя [95].

На основі побудованої моделі сформульовано задачу оптимізації зносостійкості, у якій функцію цілі задають як мінімізацію інтегрованого показника зносу Z зафіксованого ресурсу роботи або, навпаки, максимізацію ресурсу при заданих обмеженнях на напружено-деформований стан. Змінними оптимізації є геометричні параметри профілю (радіус кривини, довжина зон згину), параметри мікрорельєфу (глибина, крок, орієнтація напрямних) та режимні параметри процесу (допустимий діапазон температури й навантаження) [95].

Такий підхід забезпечує не лише якісне пояснення експериментально виявленого підвищення довговічності планок із мікрорельєфним зміцненням, а й створює кількісні критерії вибору конструкційно-технологічних параметрів для практичного проєктування деталей фальцапарату з підвищеною зносостійкістю.

3.3. Механіко-математичне моделювання профільного формоутворення та вибір геометрії фальцювальних планок із різних конструкційних матеріалів

3.3.1. Аналіз моделей профільного формоутворення та постановка задачі дослідження

У сучасній науковій літературі приділяється значна увага математичному та чисельному моделюванню процесів обробки металевих планок, зокрема профілювання, згинання, вирівнювання та холодного прокатування. Більшість робіт зосереджено на аналізі залишкових напружень, впливу конструктивних параметрів обладнання та властивостей матеріалу на напружено-деформований стан, а також на застосуванні методу скінченних елементів (МКЕ) для опису деформаційних процесів.

У низці досліджень [96–98, 112] розглянуто трибологічні аспекти контакту в зонах деформації, оцінку залишкових напружень і сил згинання під час обробки листового матеріалу. Ці результати є важливими для побудови моделей контактної взаємодії, однак більшість робіт не фокусуються на формуванні складних згинальних профілів металевих планок, характерних для деталей фальцювальних механізмів, і практично не аналізують геометричну точність отриманого профілю [112].

Інша група робіт [99–104, 112] присвячена дослідженню механічної поведінки профільних елементів та процесів правки, вирівнювання й прокатування на багатороликових машинах. У цих роботах вивчаються несівна здатність профілів, стабільність форми, механізми передачі опуклості між стадіями деформації, а також особливості асиметричного прокатування.

Водночас ці дослідження, як правило, не містять детального механіко-геометричного моделювання формування згинального профілю із урахуванням пружного повернення та не розглядають варіативність конструкційних матеріалів [112].

У працях [105–108, 112] запропоновано підходи до оцінювання впливу поперечного перерізу на кінцеву форму зігнутих планок, моделювання

багатостадійного холодного прокатування, розрахунку згинальних сил та валідації розрахунків залишкових напружень [112].

Ці роботи поєднують аналітичні, чисельні та експериментальні методи й демонструють можливості інтеграції МКЕ з лабораторними вимірюваннями. Однак і тут недостатньо розроблено питання формування складної геометрії згину, характерної для згинальних елементів фальцювальних планок, а також не розглянуто комплексний вплив матеріальних параметрів на точність профілювання [112].

Для узагальнення підходів, представлених у проаналізованих джерелах, проведено класифікацію досліджень за типами використаних моделей: аналітичні, чисельні (насамперед із застосуванням МКЕ), експериментальні та змішані [112].

На рис. 3.3.1 показано розподіл публікацій за переважачим типом моделі, що наочно демонструє домінування чисельних і змішаних підходів у сучасних дослідженнях процесів деформування металевих планок [112].

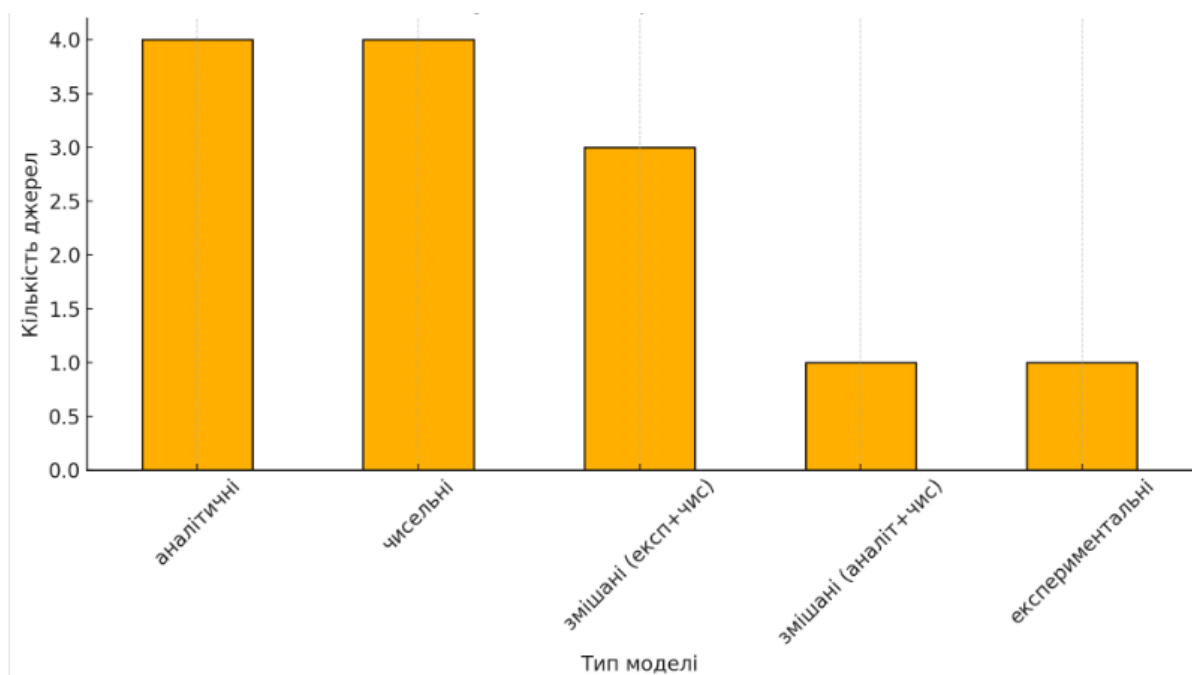


Рис. 3.3.1. Розподіл наукових джерел за типами моделей (аналітичні, чисельні, експериментальні, змішані) у літературному огляді [112]

Таким чином, наявні роботи істотно розширюють уявлення про окремі етапи обробки металевих планок – згинання, вирівнювання, прокатування.

Проте жодна з них не забезпечує комплексного механіко-математичного моделювання процесу профілювання планок для виготовлення деталей фальцювальних механізмів, яке б одночасно:

- враховувало матеріалозалежні параметри (сталі, титан, алюміній, латунь);
- описувало розподіл залишкових напружень і пластичних деформацій;
- прогнозувало пружне повернення після навантаження;
- дозволяло оцінити точність геометрії сформованого профілю [112].

Це підкреслює наукову та прикладну доцільність подальших досліджень, спрямованих на розробку узагальненої механіко-математичної моделі, яка інтегрує аналітичні залежності та чисельні методи моделювання і здатна забезпечити прогнозоване формоутворення профілю планок з урахуванням матеріалозалежних параметрів, залишкових деформацій та умов промислового застосування [112].

3.3.2. Вибір конструкційних матеріалів та оцінка їх формостійкості

Окрім сталей 05кп та 08Х18Н10Б, які розглядаються в роботі як основні матеріали для виготовлення профільних фальцювальних планок, у дослідженні використано вибірку конструкційних матеріалів із різними механічними та фізичними властивостями [112].

Залучення холоднокатаної низьковуглецевої сталі DC01, корозійностійкої аустенітної сталі 08Х18Н10Т (аналог AISI 321), технічно чистого титану BT1-0 (аналог Titanium Grade 2), алюмінієвого деформівного сплаву АД33 (аналог EN AW-6061) та латуні Л63 було спрямоване на моделювання процесу одноразової пластичної деформації та виявлення загальних закономірностей формування стабільного профілю металевих фальцювальних планок [112].

Зазначені матеріали не розглядаються як альтернативні для практичного застосування у фальцювальних механізмах, а використовуються як модельні

для аналізу впливу пластичних властивостей матеріалу на кінематичні та геометричні параметри профілювання. До вибірки увійшли (табл. 3.3.1) [112]:

- Сталь холоднокатана низьковуглецева DC01 (ДСТУ EN 10130; EN 10130; аналог AISI 1008), яка характеризується високою технологічною формоздатністю та доброю придатністю до холодного пластичного деформування;

- Сталь корозійностійка аустенітна 08X18H10T (ДСТУ ГОСТ 5632; аналог AISI 321) — хромонікелева сталь, стабілізована титаном, що вирізняється підвищеною пластичністю, стійкістю до міжкристалітної корозії та стабільною деформаційною поведінкою;

- Титан технічно чистий BT1-0 (ГОСТ 19807; аналог Titanium Grade 2, UNS R50400), який має низьку густину, високу корозійну стійкість і помірні міцнісні характеристики, що зумовлює специфіку його пружно-пластичного деформування;

- Алюмінієвий деформівний сплав АД33 (ГОСТ 4784; аналог EN AW-6061, AlMg1SiCu), що поєднує малу густину, достатню міцність і сприятливі умови для формування пластичної деформації;

- Латунь деформівна Л63 (ДСТУ ГОСТ 15527; аналог CuZn37) — мідно-цинковий сплав із високою пластичністю та стабільною поведінкою при холодному деформуванні [112].

Таблиця 3.3.1.

Характеристики конструкційних матеріалів для моделювання процесу профілювання фальцювальних планок

Матеріал (ДСТУ/ГОСТ; EN/AISI/UNS)	$\sigma_{0,2}$, МПа	E, ГПа	ν	ρ , г/см ³	n
Сталь холоднокатана DC01 (ДСТУ EN 10130:2009; EN 10130:2006; AISI 1008)	140	210	0,29	7,85	0,20
Сталь корозійностійка 08X18H10T (ДСТУ ГОСТ 5632:2016; ГОСТ 5632-2014), аналог AISI 321	205	190	0,30	7,90	0,25

Титан BT1-0 (ГОСТ 19807-91), аналог Titanium Grade 2 (UNS R50400)	275	105	0,34	4,51	0,18
Сплав Al АД33 (ГОСТ 4784-97), аналог EN AW-6061 (AlMg1SiCu)	276	69	0,33	2,70	0,16
Латунь Л63 (ДСТУ ГОСТ 15527:2005; ГОСТ 15527-2004), аналог CuZn37	210	100	0,31	8,50	0,22

Примітка. $\sigma_{0,2}$ – умовна границя плинності; E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона; ρ – густина; n – показник деформаційного зміцнення; значення подано для температури 20 ± 2 °C (за замовчуванням). Позначення «аналог» наведено для зіставлення систем маркування і не означає повної взаємозамінності. Нормативні документи: ДСТУ EN 10130:2009 (IDT EN 10130:2006); ДСТУ ГОСТ 5632:2016 (на основі ГОСТ 5632-2014); ДСТУ ГОСТ 15527:2005.

У табл. 3.3.1 наведено пріоритетні фізико-механічні характеристики обраних матеріалів: границя плинності, модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, густина та показник зміцнення n . Ці параметри безпосередньо впливають на кінематичний стан деформування, напружений стан, глибину пластичної зони та величину пружного повернення після зняття навантаження [112].

Порівняльні діаграми (рис. 3.3.2) наочно демонструють суттєві відмінності між обраними матеріалами за ключовими фізико-механічними характеристиками [112].

Холоднокатана низьковуглецева сталь DC01 та корозійностійка аустенітна сталь 08X18H10T характеризуються підвищеною жорсткістю та відносно високою границею плинності, що зумовлює формування локалізованої пластичної зони в процесі профілювання [112].

Алюмінієвий деформівний сплав АД33 та латунь Л63 мають нижчий модуль Юнга і вищу формоздатність, що сприяє більш рівномірному просторовому розподілу деформацій.

Технічно чистий титан BT1-0 займає проміжне положення, поєднуючи високу границю плинності з відносно низькою жорсткістю, що зумовлює

специфічний характер пружного повернення та стабілізації сформованого профілю [112].

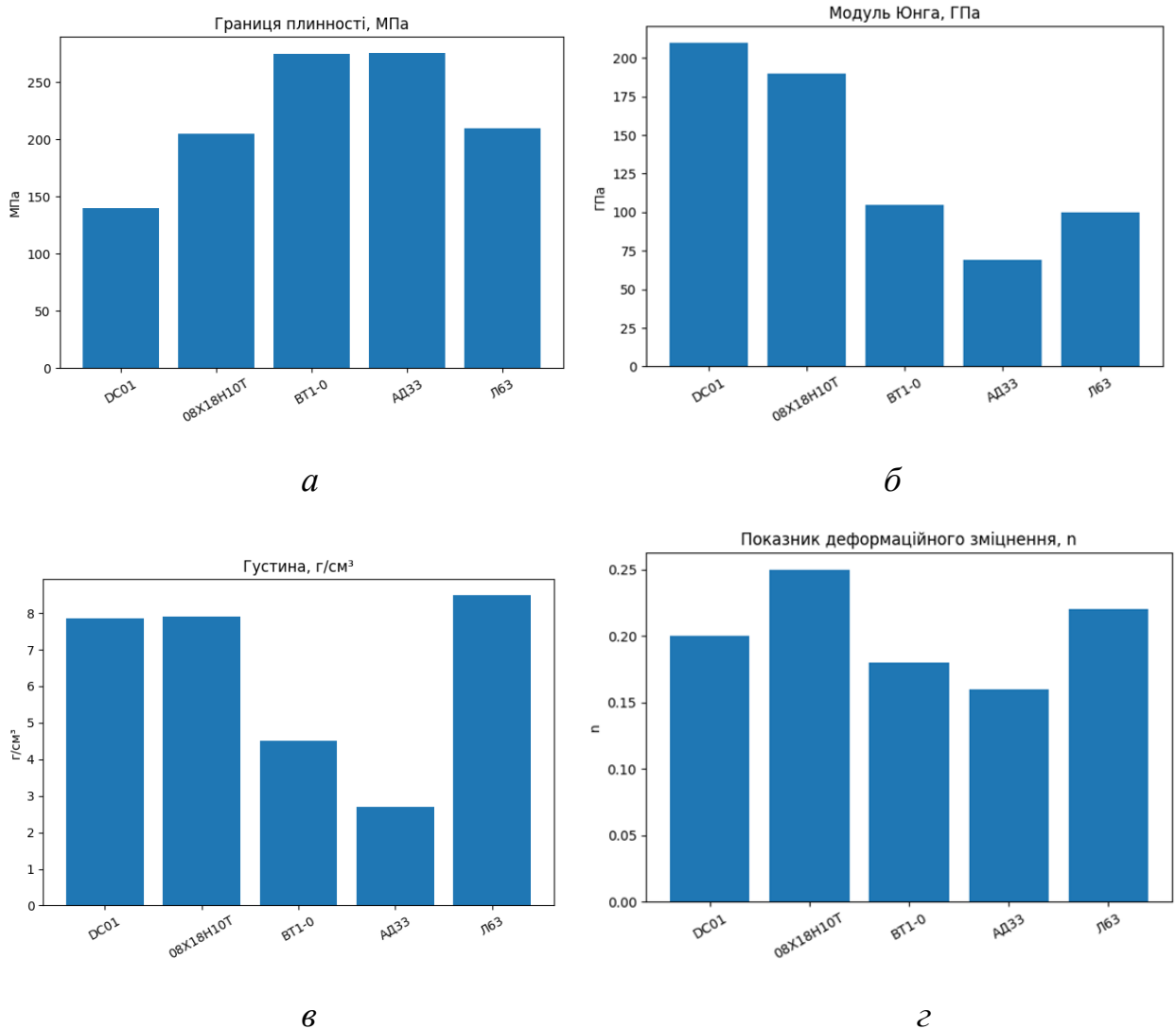


Рис. 3.3.2. Порівняння механічних та фізичних характеристик конструкційних матеріалів, використаних для моделювання процесу профілювання фальцювальних планок: *а* – границя плинності матеріалів; *б* – модуль Юнга; *в* – густина матеріалів; *г* – показник деформаційного зміцнення n [112]

Для врахування цих відмінностей під час подальшого моделювання процесу профільного формоутворення побудовано узагальнену геометричну модель (рис. 3.3.3). Вона описує прямокутну металеву планку розмірами $100 \times 20 \times 1$ мм, яка піддається локальній пластичній деформації під дією

профільованого індентора. Форма індентора задається цільовою функцією профілю $y=f(x)$, що відповідає одній із розглянутих геометричних моделей (логістичній, синусоїдальній, параболічній або евольвентній). Контактна взаємодія моделюється у вигляді нелінійних контактних зв'язків із рахуванням пертя за законом Кулона з коефіцієнтом тертя $\mu=0,12$ [112].

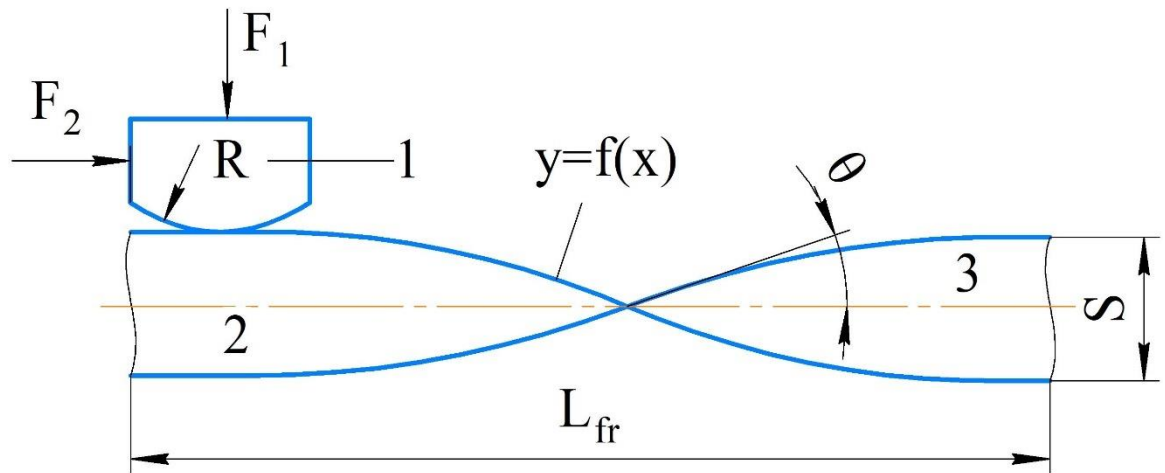


Рис. 3.3.3. Схема формоутворення профілю фальцювальної планки методом локальної пластичної деформації: 1 – профільований індентор; 2 – металева смуга до деформації; 3 – профільована зона після пластичної деформації; F_1 , F_2 – зусилля деформації; R – радіус сферичної формувальної поверхні індентора L_{fr} – довжина зони деформування; S – ширина кінцевої деформованої ділянки; θ – кут профілю деформації; $y=f(x)$ – функція, що описує форму профілю [112]

Матеріальні властивості кожного з матеріалів у моделі задано у вигляді пружно-пластичної залежності з ізотропним зміцненням, із використанням критерію плинності Мізеса [109] в діапазоні деформацій до 20 %. Це дає змогу відтворити характерну поведінку матеріалу при одноразовому профільному навантаженні та оцінити, наскільки стабільно він зберігає надану форму після розвантаження [112].

Для первинної кількісної оцінки формостійкості застосовано показник, що базується на добутку модуля Юнга E та границі плинності σ_y . Цей добуток розглядається як інтегральний індикатор здатності матеріалу протистояти

пластичній деформації та пружному відновленню профілю. Отримані значення було нормалізовано до інтервалу $[0;1]$, що дозволило побудувати порівняльну діаграму формостійкості (рис. 3.3.4) [112].

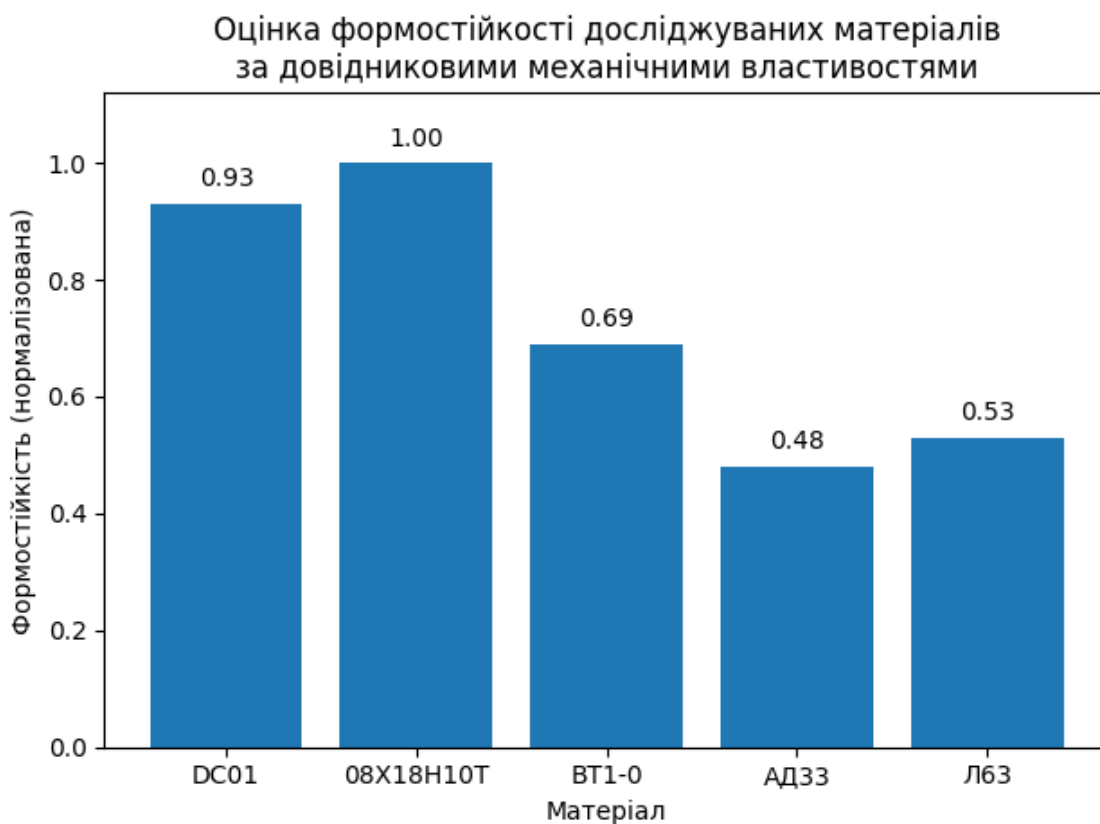


Рис. 3.3.4. Оцінка формостійкості досліджуваних матеріалів за довідниковими механічними властивостями (нормалізовані значення) [112]

З аналізу діаграми випливає, що найбільші значення нормалізованого показника формостійкості характерні для корозійностійкої аустенітної сталі 08X18H10T, дещо нижчі – для холоднокатаної низьковуглецевої сталі DC01. Для титану BT1-0 та латуні Л63 значення формостійкості мають проміжний характер, тоді як мінімальні значення зафіксовано для алюмінієвого деформівного сплаву АД33, що узгоджується з його низьким модулем Юнга та підвищеною формоздатністю [112].

Такий підхід дозволяє виконати кількісне порівняння потенціалу конструкційних матеріалів до збереження форми після профільної пластичної деформації й сформулювати початкові припущення щодо їх придатності для

виготовлення фальцювальних планок із заданими вимогами до точності профілю та стабільності геометрії. З урахуванням отриманих оцінок формостійкості постає необхідність у виборі таких геометричних профілів фальцювальних планок, які мінімізують вплив пружного повернення та сприяють стабільному формоутворенню незалежно від типу матеріалу. У цьому контексті доцільним є порівняння аналітичних моделей профілів, що відрізняються характером кривини та потенціалом до забезпечення рівномірного згину.

3.3.3. Геометричні моделі профілів фальцювальних планок та їх відповідність конструкційним матеріалам

На рисунку 5 наведено три базові типи профілів фальцювальних планок – синусоїдальний, параболічний та логістичний, – які характеризуються плавною зміною кривини та придатні до формування в умовах пластичної деформації металевих пластин з різними показниками жорсткості та пластичності (рис.3.3.5) [112].

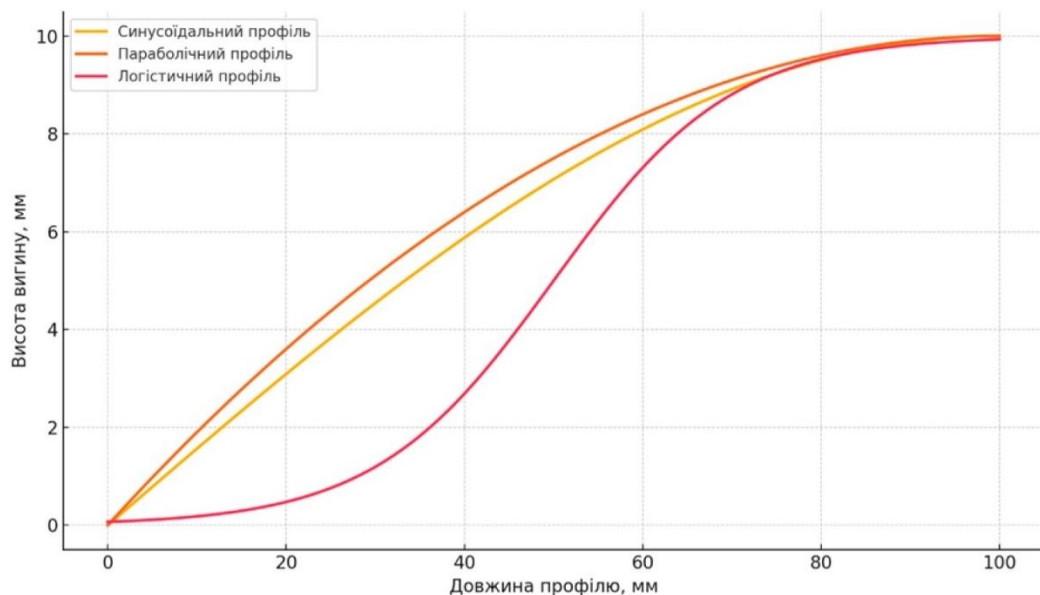


Рис. 3.3.5. Геометричні профілі фальцювальних планок, побудовані на основі синусоїдальної, параболічної та логістичної залежностей

Синусоїдальний профіль описується періодичною функцією виду

$$y(x) = x \cdot \sin\left(\frac{\pi x}{2L}\right) \quad (3.3.1)$$

де $y(x)$ – висота профілю в точці x ; h – амплітуда вигину (максимальна висота); L – довжина профільованої ділянки.

Така крива забезпечує плавне зростання й спадання висоти профілю без різких змін кривини. Для металів із відносно рівномірною деформаційною поведінкою (зокрема алюмінієвих і титанових сплавів) це дозволяє уникнути локальних піків напружень поблизу вершини вигину. Основні переваги синусоїдального профілю полягають у помірному узгодженні з природною траєкторією згину під дією поступального навантаження, відсутності різких змін кривини та простоті реалізації як у чисельному моделюванні, так і в технологічних операціях (холодне гнуття за шаблоном, видавлювання) [112].

Параболічний профіль задається функцією виду (3.3.2),

$$y(x) = h \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2\right) \quad (3.3.2)$$

де $y(x)$ – вертикальне відхилення профілю в точці x ; h – максимальна висота вигину; L – довжина профілю.

У цьому випадку висота профілю від нуля до вершини зростає монотонно, а кривина змінюється плавно по всій довжині. Це забезпечує рівномірне наростання деформації матеріалу в процесі профілювання, що особливо важливо для сталей з помірною пластичністю, де надлишкові локальні деформації можуть призводити до появи залишкових напружень і втрати формостійкості. Завдяки простому аналітичному опису та відсутності розривів похідних параболічний профіль є зручним для як чисельного аналізу, так і експериментального відтворення на валкових або штампувальних лініях [112].

Логістичний профіль описується S-подібною функцією (3.3.3),

$$y(x) = \frac{h}{1 + e^{-k(x-x_0)}} \quad (3.3.3)$$

де

- $y(x)$ – вертикальне відхилення профілю в точці x ,
- h – максимальна висота вигину,
- x_0 – координата точки перегину (середина перехідної зони),
- k – параметр крутості вигину, що визначає характер зміни кривини.

Така крива симетрична відносно $x=x_0$ та характеризується плавним переходом від слабкого до інтенсивнішого згину в середині профілю із подальшим виходом на майже сталу висоту. Контроль параметра k дає змогу регулювати довжину перехідної зони й інтенсивність локальної деформації. Для матеріалів, чутливих до концентрацій напружень, логістичний профіль є перспективним, оскільки поєднує відносно м'який початок деформування з контрольованою ділянкою максимального згину без різких стрибків кривини [112].

Поряд із цими плавними функціями важливим є розгляд евольвентного профілю, який у попередніх підрозділах було обґрунтовано як основу для побудови згинальних елементів фальцювальних планок. Евольвентна крива (евольвента кола) задається параметричними рівняннями (3.3.4),

$$\begin{aligned}x(\varphi) &= R \cdot (\cos\varphi + \varphi \cdot \sin\varphi) \\y(\varphi) &= R \cdot (\sin\varphi - \varphi \cdot \cos\varphi)\end{aligned}\tag{3.3.4}$$

де R – радіус базового кола; φ – параметр (кут), який задає довжину розгортання кривої.

На відміну від аналітично простіших синусоїдальних, параболічних та логістичних залежностей, евольвента має чітко визначений геометричний зміст як траєкторія розмотування нитки з кола, що забезпечує поступове наростання кривини при віддаленні від точки дотику. На рисунку 6 показано фрагмент евольвентної кривої при $R=20$ мм, який може використовуватися як геометрична основа згинального профілю фальцювальної планки для формування інтегральних обкладинок (рис. 3.3.6) [112].

Такий профіль забезпечує рівномірніший розподіл деформацій уздовж напрямної, зменшуючи ризик локального перенавантаження матеріалу у зоні вершини згину. Це особливо актуально для сталей з високою формостійкістю (наприклад, 08X18H10T), де збереження точності профілю після одноразового пластичного деформування істотно впливає на стабільність процесу фальцювання [112].

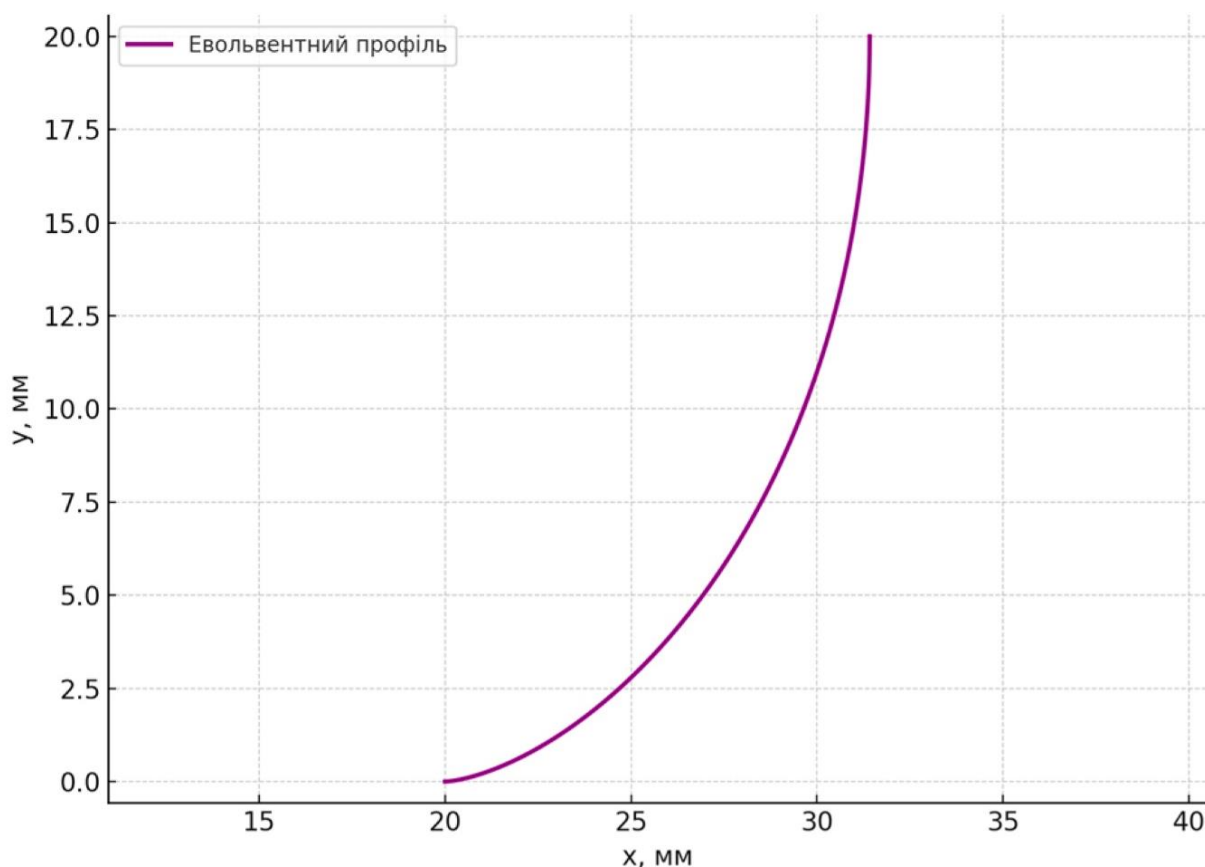


Рис. 3.3.6. Евольвентна крива як геометрична основа для побудови згинального профілю з рівномірним наростанням деформації [112]

Для різних матеріалів із вибірки конструкційних металів (холоднокатана низьковуглецева сталь DC01, корозійностійка аустенітна сталь 08X18H10T, титан технічно чистий BT1-0, алюмінієвий деформівний сплав АД33 та латунь Л63) на основі нормалізованого критерію формостійкості та аналізу деформаційної поведінки сформовано рекомендації щодо вибору типу геометричного профілю фальцювальних планок (табл. 3.3.2) [112].

Таблиця 3.3.2.

Рекомендовані геометричні профілі для конструкційних матеріалів

Матеріал	Сприятливий геометричний профіль	Обґрунтування
08X18H10T	Логістичний / Параболічний	Висока формостійкість і жорсткість забезпечують стабільне формоутворення та точне збереження геометрії після розвантаження
DC01	Параболічний / Логістичний	Оптимальне поєднання жорсткості та пластичності дозволяє формувати згин без локального перевантаження матеріалу
Л63	Синусоїдальний	Висока пластичність і низька жорсткість зумовлюють доцільність м'якого, рівномірного розподілу деформацій
BT1-0	Синусоїдальний / Евольвентний	Поєднання високої границі плинності з низьким модулем Юнга потребує рівномірного формування для зменшення пружного повернення
АД33	Синусоїдальний / Параболічний	Низька жорсткість і підвищена формоздатність вимагають плавної зміни кривизни для уникнення нестабільності профілю

Таблиця 3.3.2 містить порівняльне зіставлення, в межах якого для кожного матеріалу визначено один або кілька профілів, що забезпечують сприятливе поєднання рівномірності згину, допустимого рівня напружень і потенціалу до збереження геометричної стабільності після розвантаження [112].

На рисунку (рис. 3.3.7) наведено діаграму сприятливості, яка узагальнює результати табл. 2 у вигляді бінарної матриці відповідності «матеріал – профіль». Заповнені комірки відображають профілі, рекомендовані для конкретного матеріалу з погляду його пружно-пластичних характеристик. Таке подання дозволяє наочно оцінити доцільність використання синусоїдальних, параболічних, логістичних та евольвентних профілів для різних конструкційних матеріалів фальцювальних планок та обґрунтовано

обирали геометрію профілю залежно від вимог до формостійкості та умов навантаження [112].

Матеріал	AISI 1008	0	1	1	0
	AISI 321	0	1	1	0
	Al 6061	0	0	1	1
	Ti Grade 2	1	0	0	1
	Л63	0	0	0	1
		Евольвентний	Логістичний	Параболічний	Синусоїдальний
		Тип профілю			

Рис. 3.3.7. Діаграма сприятливості геометричних профілів до конструкційних матеріалів з позиції їх здатності до формоутворення [112]

3.3.4. Механіко-математична модель пружно-пластичного згину з урахуванням контактної взаємодії та тертя

Для поглибленого аналізу формоутворення профільованих планок після вибору конструкційних матеріалів та геометричних профілів доцільно перейти до механіко-математичного опису процесу згину. Розглянуто задачу двовимірного згинання плоскої металевої планки, яка переміщується вздовж жорсткого профілювального індентора із заданою кривою $y=f(x)$ (синусоїдальною, параболічною, логістичною або евольвентною).

Прийнято такі кінематичні припущення:

- деформування відбувається в площині згину xOy (площинний напружено-деформований стан);
- контакт між планкою та інструментом задається вздовж криволінійної поверхні з нормальним тиском $p(x)$;
- зміна товщини планки є малою, а геометрія згину задається функцією профілю $y=f(x)$.

Матеріал планки описано пружно-пластичною моделлю з ізотропним зміцненням типу Гука–Генкі [113]. У пружній області використовується лінійний закон деформування (3.3.5), який встановлює пропорційну залежність між напруженням і деформацією через модуль Юнга E .

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.3.5)$$

де σ – напруження, ε – деформація, E – модуль Юнга.

Після досягнення границі плинності σ_y деформування переходить у пластичну область, що описується степеневим законом зміцнення (6) із параметрами K та n , які відображають інтенсивність наклепу матеріалу.

$$\sigma = \sigma_y + K \cdot \varepsilon^n \quad (3.3.6)$$

де σ_y – границя плинності, K – коефіцієнт зміцнення, n – показник зміцнення.

Сукупність співвідношень (3.3.5)–(3.3.6) забезпечує єдину модель переходу від пружної до пластичної поведінки й дозволяє коректно описати накопичення залишкових деформацій (рис. 3.3.8) [112].

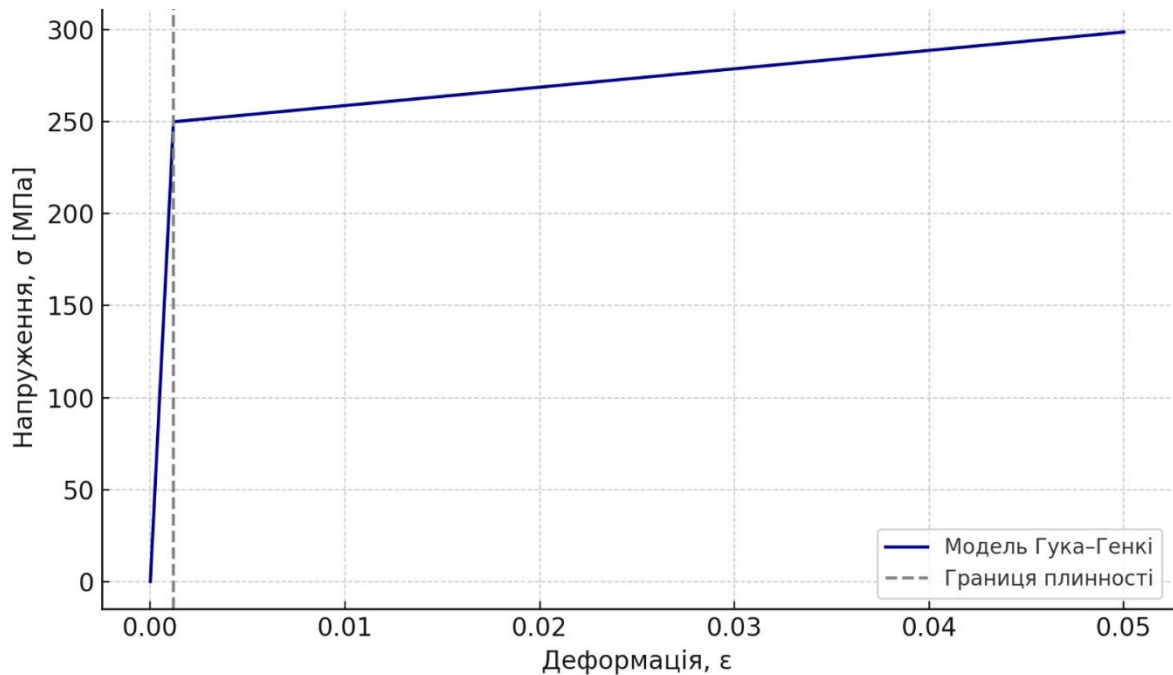


Рис. 3.3.8. Напружено-деформований стан матеріалу згідно з моделлю Гука–Генкі із пружною та пластичною областями деформації.

Контактна взаємодія планки з інструментом враховується за класичною моделлю сухого тертя Кулона [114]. Сила тертя F_t пропорційна нормальній силі N :

$$F_t = \mu N, \quad (3.3.7)$$

де μ – коефіцієнт тертя, що характеризує пару «інструмент–матеріал». Для уточнення умов ковзного та передковзного режимів використовуються коефіцієнти статичного та кінетичного тертя μ_s і μ_k , що задаються відповідно у співвідношеннях (3.3.8), (3.3.9) [112].

$$F_t \leq \mu_s \cdot N \quad (3.3.8)$$

де μ_s – коефіцієнт статичного тертя;

$$F_t = \mu_k \cdot N \quad (3.3.9)$$

де: μ_k – коефіцієнт кінетичного тертя, що зазвичай є меншим за μ_s ;

Це дозволяє врахувати вплив тертя на розподіл контактних напружень, опір переміщенню матеріалу в зоні контакту та точність відтворення профілю.

У межах прийнятої моделі закон деформування (3.3.10) поєднує пружну та пластичну складові деформацій [112].

$$\sigma = K \cdot (\varepsilon_p)^n \quad (3.3.10)$$

де ε_p – пластична складова повної деформації.

Для опису напружено-деформованого стану в площинній постановці використовуються нормальні напруження σ_x , σ_y , дотичні напруження τ_{xy} та відповідні деформації ε_x , ε_y , γ_{xy} .

Кривина деформованого профілю та глибина пластичної зони визначаються співвідношеннями (3.3.11)–(3.3.13), що дає змогу кількісно оцінити розподіл пружних і пластичних деформацій по товщині планки та виявити область інтенсивної локалізації пластичності поблизу вершини згину [112].

$$\sigma(y) = E \cdot \kappa \cdot y, \quad |y| < y_{el}, \quad (3.3.11)$$

де κ – кривина, y_{el} – межа еластичної зони.

$$\sigma(y) = \sigma_y, \quad |y| > y_{el} \quad (3.3.12)$$

Момент при згині з урахуванням пластичності:

$$M = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x(y) \cdot y dy \quad (3.3.13)$$

Контакт із профілювальним інструментом описується через нормальний тиск $p(x)$ та тангенціальні реакції тертя, які включено до граничних умов задачі у вигляді додаткових поверхневих сил (14).

$$\tau = \mu \cdot p(x) \quad (3.3.14)$$

Це забезпечує узгоджений опис силової взаємодії «інструмент–планка» і дає змогу оцінити не лише внутрішні напруження в матеріалі, а й зовнішні реакції, що виникають на робочих поверхнях згинальних елементів [112].

Для побудови чисельної схеми використано варіаційну постановку задачі як задачі мінімізації потенціальної енергії деформації (3.3.15) у області Ω з урахуванням граничних умов на межах Γ .

$$\Pi = \int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} - \sigma_y \cdot \varepsilon_p \right) d\Omega - \int_{\Gamma} T_i u_i d\Gamma, \quad (3.3.15)$$

де Ω – область смуги, Γ – контактна межа.

У варіаційну формулу входять енергія пружнопластичного деформування та робота зовнішніх навантажень, у тому числі контактного тиску та сил тертя на поверхні інструмента [112].

Такий підхід є принципово сумісним із методом скінченних елементів і дозволяє реалізувати модель у чисельному вигляді для різних комбінацій геометрії профілю та матеріалів [112].

На основі сформульованої моделі виділено ключові вихідні параметри, які характеризують перебіг процесу формоутворення та стабільність отриманого профілю [112].

Вони згруповані в табл. 3 та охоплюють розподіл напружень і деформацій, глибину пластичної зони, кривину профілю після розвантаження

(пружне повернення), сили формоутворення, контактні реакції інструмента, а також еквівалентні напруження й деформації [112]:

Таблиця 3.

Основні вихідні параметри моделі деформування металевої смуги

№	Параметр	Опис	Позначення / одиниці вимірювання
1	Розподіл нормальних напружень	Напруження в напрямках деформування по осях x і y	σ_x, σ_y [МПа]
2	Розподіл деформацій	Відносні зміни розмірів у напрямках x і y	$\varepsilon_x, \varepsilon_y$ [–]
3	Глибина пластичної зони	Товщина шару з незворотними деформаціями	h_{pl} [мм]
4	Кривизна профілю після зняття навантаження	Геометричне відхилення профілю, зумовлене пружним поверненням	R або $\Delta\kappa$ [1/мм], [мм]
5	Сили формоутворення	Сумарне навантаження, необхідне для досягнення заданої форми	F_{form} [Н]
6	Контактні реакції інструмента	Сили нормального й тангенціального тиску	F_{norm}, F_{tang} [Н]
7	Еквівалентне напруження за Мізесом	Узагальнена характеристика напруженого стану	σ_{eq} або $\sigma_{von Mises}$ [МПа]
8	Еквівалентна пластична деформація	Ступінь накопичення пластичних змін	ε_{pl}, e_q [–]
9	Поле залишкових деформацій	Карта деформацій після вивантаження, що впливають на стабільність	ε_{res} [–]
10	Вектор зміщення вузлів	Загальні переміщення матеріалу в процесі формоутворення	u_x, u_y [мм]

3.3.5. Чисельна реалізація моделі та рекомендації щодо вибору геометрії фальцювальних планок

Запропонована механіко-математична модель є придатною для чисельної реалізації із застосуванням методу скінченних елементів (МКЕ), що дає змогу

варіювати вхідні параметри та досліджувати вплив технологічних факторів на характер формоутворення. У рамках моделювання аналізувалися:

- вибір матеріалу фальцювальної планки (AISI 321, AISI 1008, Ti Grade 2, Al 6061, Л63);
- геометрія профілювального інструмента (синусоїдальний, логістичний, параболічний, евольвентний профілі);
- величина прикладеної деформувальної сили;
- умов тертя в зоні контакту інструмента з матеріалом.

На основі побудованої МКЕ-моделі отримано розподіли еквівалентних напружень за Мізесом, еквівалентних пластичних деформацій, а також поле пружного повернення після зняття навантаження (рис. 3.3.9–3.3.11). Це забезпечує комплексну кількісну оцінку напружено-деформованого стану, ступеня накопичення пластичності та точності відтворення профілю [112].

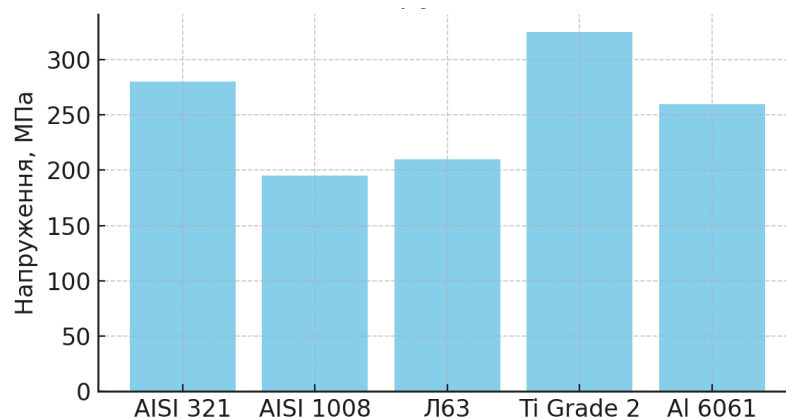


Рис. 3.3.9. Порівняння еквівалентних напружень за Мізесом для різних матеріалів при пластичній деформації.

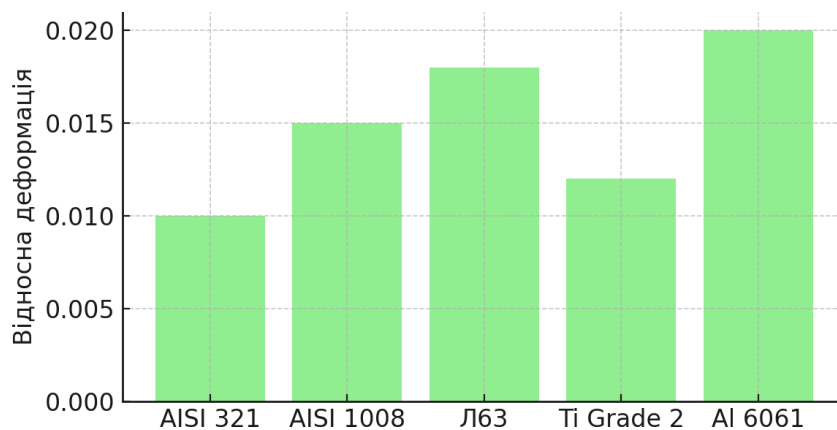


Рис. 3.3.10. Зіставлення відносної пластичної деформації для різних конструкційних матеріалів

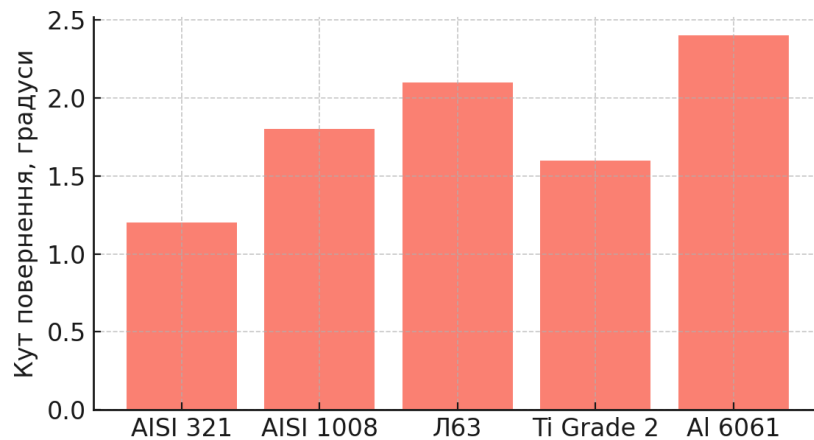


Рис. 3.3.11. Пружне повернення після зняття навантаження для різних матеріалів, виражене у вигляді кута відновлення профілю

У реальних конструкціях напружений стан є просторовим, тому для його узагальненої оцінки використано еквівалентне напруження за Мізесом, яке дає змогу звести багатовісний стан до одного скалярного показника, порівнянного з границею плинності матеріалу [112].

На діаграмі (рис. 3.3.9) наведено максимальні значення еквівалентних напружень для аналізованих матеріалів. Найвищий рівень напружень зафіксовано для Ti Grade 2 та AISI 321, що свідчить про інтенсивну концентрацію внутрішніх сил у відповідь на контактну дію профілювального інструмента [112].

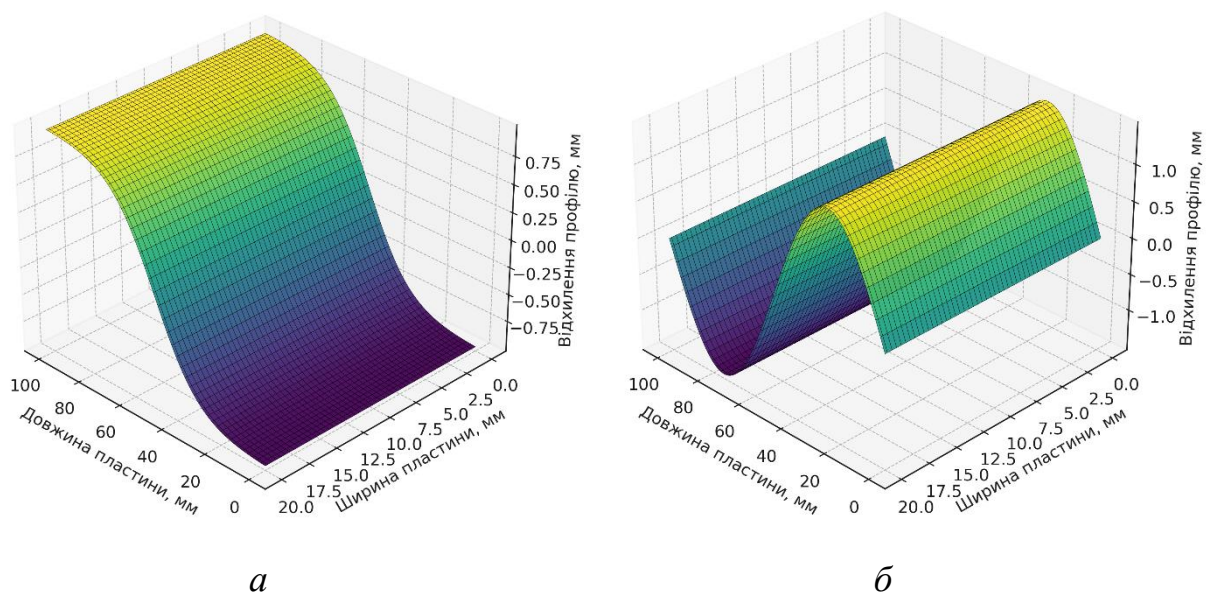
Для більш м'яких матеріалів (Al 6061, Л63) рівень $\sigma_{\text{von Mises}}$ є нижчим, однак їхня деформаційна відповідь характеризується значно більшою пластичністю [112]. Діаграма на рис. 3.3.10 відображає характер накопичення еквівалентної пластичної деформації в об'ємі матеріалу. Найвищі значення пластичної деформації отримано для сплаву Al 6061, дещо менші – для Л63.

Сталь AISI 321 демонструє мінімальний рівень пластичної деформації, що вказує на її обмежену здатність до незворотних деформацій під

навантаженням. Така різниця в поведінці матеріалів є суттєвою для вибору режимів формоутворення: надлишкова локалізація пластичності може призводити до втрати формостійкості, тоді як недостатня – до підвищених напружень і ризику зародження втомних пошкоджень [112]. На рис. 3.3.11 показано величину пружного повернення, представлену у вигляді кута відновлення профілю після зняття навантаження. Цей параметр безпосередньо характеризує точність відтворення заданої геометрії та залежить, передусім, від жорсткості матеріалу (модуля Юнга) й співвідношення пружних і пластичних деформацій [112].

Жорсткі матеріали (AISI 321, Ti Grade 2) мають більшу схильність до пружного повернення, що потребує коригування геометрії інструмента з урахуванням очікуваної зміни кривини після вивантаження. Для більш пластичних матеріалів (Al 6061, Л63) кут відновлення є меншим, але зростає ризик надмірного “розтікання” пластичної зони [112].

Для оцінювання геометричних особливостей процесу формоутворення базових типів профілів, які можуть бути застосовані як функціональні поверхні фальцювальних планок, побудовано тривимірні моделі пластин із відображенням відхилення по осі Z залежно від обраної траєкторії профілю (рис. 3.3.12) [112].



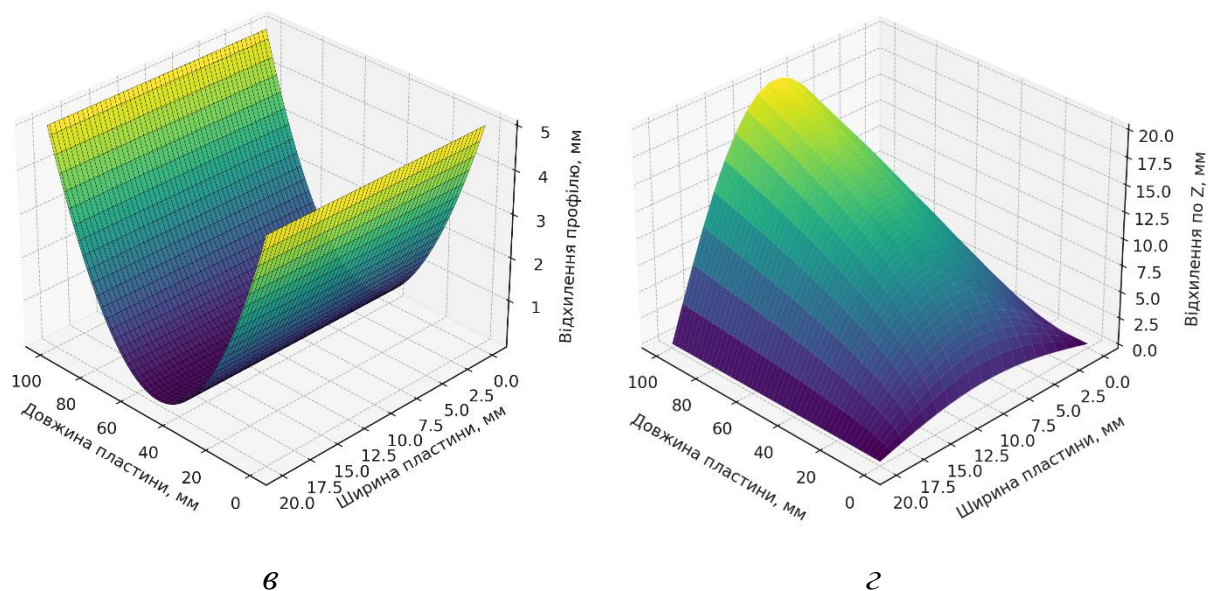


Рис. 3.3.12. Геометричні моделі формоутворення профілів згинальних елементів: *а* – синусоїдальний профіль; *б* – логістичний профіль; *в* – параболічний профіль; *г* — евольвентний профіль [112].

На цих моделях наочно показано, як синусоїдальний, логістичний, параболічний та евольвентний профілі впливають на розподіл деформацій по довжині згинального елемента. Плавність зміни кривини та відсутність різких перегинів для логістичного й евольвентного профілів сприяють рівномірнішому розподілу деформацій, тоді як окремі варіанти параболічних і синусоїдальних профілів можуть створювати локальні зони підвищеного згину [112].

На підставі тривимірних моделей формоутворення згинальних елементів (рис. 3.3.12) виконано додатковий аналіз розподілу напружено-деформованого стану в металевих планках для різних матеріалів. Отримані дані узагальнено у вигляді типової 3D-діаграми (рис. 3.3.13), що відображає характерну структуру зон деформації (переважно пружної, перехідної та інтенсивної пластичної) у поперечному перерізі планки [112].

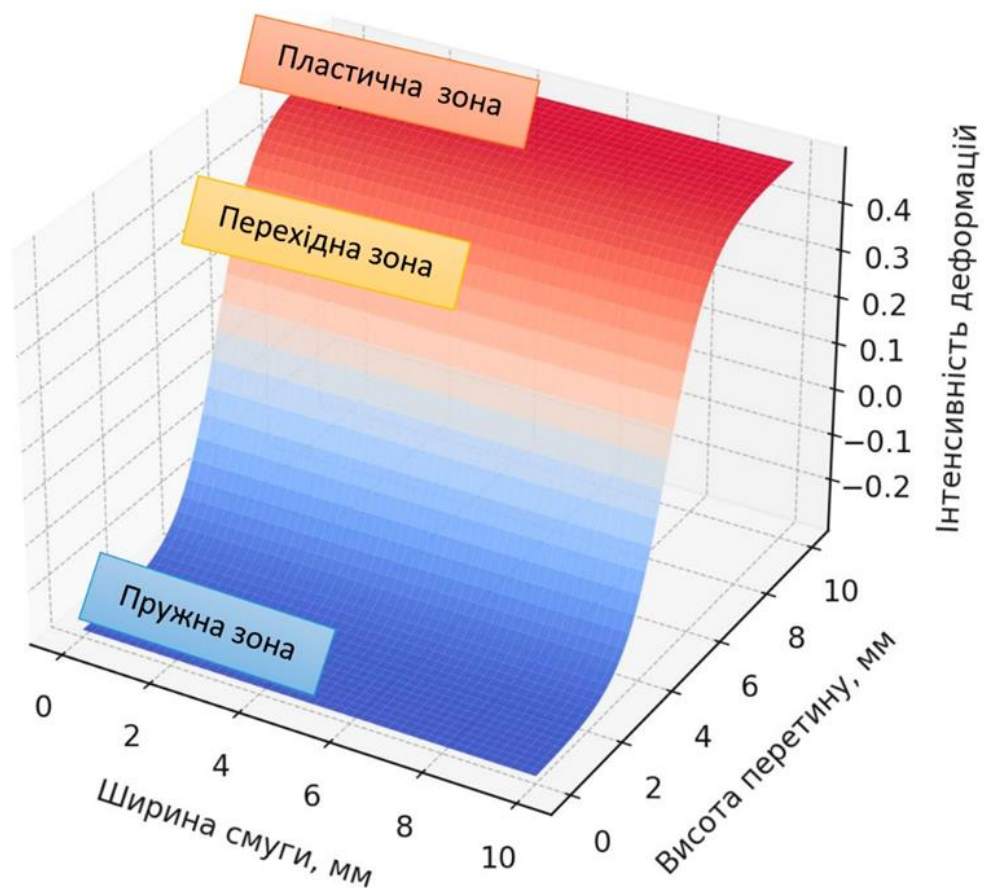


Рис. 3.3.13. Узагальнена діаграма зон деформації фальцювальних планок

Така інтерпретація дає змогу ідентифікувати положення та протяжність пластичної зони, оцінити товщину перехідного шару та встановити зв'язок між геометрією профілю і стабільністю форми після формування [112].

Узагальнення результатів чисельного моделювання показало, що:

- для матеріалів із високою формостійкістю (AISI 321, Ti Grade 2) доцільно використовувати профілі з плавною зміною кривини (логістичні та евольвентні), які забезпечують прийнятний рівень напружень за Мізесом та контрольовану товщину пластичної зони;

- для більш пластичних матеріалів (Al 6061, Л63) припустимим є застосування синусоїдальних і параболічних профілів, однак необхідно обмежувати глибину профілю, щоб уникнути надмірного накопичення пластичної деформації та втрати точності профілю;

– отримані карти пружного повернення дають підстави для цілеспрямованої корекції геометрії інструмента з урахуванням остаточної кривини після вивантаження, що особливо актуально для сталей із високим модулем Юнга [112].

Застосування механіко-математичної моделі та її чисельної реалізації дозволяє суттєво скоротити обсяг експериментальних досліджень на етапі проєктування фальцювальних планок. Попередній аналіз напружено-деформованого стану, пружного повернення та зон локалізації пластичності дає змогу обґрунтовано вибирати тип профілю та матеріал планки для забезпечення необхідної точності, ресурсу роботи та зносостійкості згинальних елементів у механізмах фальцювання інтегральних обкладинок.

Висновки до розділу 3

1. Побудовано механіко-математичні моделі деформування профільних фальцювальних планок з урахуванням композитної будови «основа – зміцнений шар» і просторового профілю, що дозволило кількісно описати напружено-деформований стан та визначити критичні зони концентрації напружень.

2. Розроблено FEM-моделі для розгортки інтегральної обкладинки та фальцювальних планок, а їх адекватність підтверджено експериментальною верифікацією методом відеоекстензометрії через узгодження розрахункових і вимірних полів деформацій.

3. Запропоновано підхід до оцінювання надійності фальцювання на основі ймовірнісних критеріїв пошкодження та коефіцієнта безпеки, що пов'язує варіативність властивостей матеріалів і режимів процесу з ризиком дефектів.

4. Сформовано узагальнену модель зносостійкості планок з урахуванням контактного тиску, шляху ковзання, температури, твердості зміцненого шару та параметрів мікрорельєфу, включно з ефективним коефіцієнтом зношування, залежним від температури й шорсткості.

5. Показано, що раціональні параметри мікрорельєфу та плавні профілі (зокрема евольвентні) знижують концентрацію напружень і стабілізують тертя, що зменшує інтенсивність зносу та підвищує ресурс фальцювальних планок.

6. На основі моделей сформульовано задачі оптимізації з мінімізацією деформацій і інтегрального показника зносу та визначено доцільні діапазони параметрів профілю, мікрорельєфу й режимів фальцювання для забезпечення стабільної якості інтегральних обкладинок.

7. Отримані результати формують теоретико-методичну базу для подальших експериментальних досліджень і практичної перевірки запропонованих технологічних та конструкційних рішень щодо вдосконалення деталей фальцапарату.

РОЗДІЛ 4.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ ЗМІЦНЮВАЛЬНОГО МІКРОРЕЛЬЄФУ НА ПРОФІЛЬНИХ ФАЛЬЦЮВАЛЬНИХ ПЛАНКАХ

4.1. Мета та завдання експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень є перевірка адекватності математичних і чисельних моделей деформування та зношування профільних фальцювальних планок, розроблених у розділі 3, а також оцінювання ефективності лазерного й інденторного формування зміцнювального мікрорельєфу в умовах, наближених до реальної експлуатації.

Для досягнення поставленої мети в розділі передбачено розв'язання таких основних завдань:

- експериментально сформувати зміцнювальний мікрорельєф на зразках фальцювальних планок зі сталей 05кп і 08Х18Н10Б з використанням лазерної та інденторної обробки;
- дослідити геометричні параметри мікрорельєфу, мікроструктуру та мікротвердість приповерхневих шарів;
- встановити вплив режимів обробки на однорідність і стабільність сформованого мікрорельєфу;
- зіставити експериментальні результати з даними чисельного моделювання та оцінити їх узгодженість;
- сформувати рекомендації щодо доцільності застосування відповідних технологій зміцнення для деталей фальцапарату інтегральних обкладинок.

4.2. Об'єкти, матеріали, обладнання та методи досліджень

Об'єктами експериментальних досліджень є процеси формування зміцнювального мікрорельєфу на робочих поверхнях профільних фальцювальних планок, виготовлених зі сталей 05кп та 08Х18Н10Б, які застосовуються у фальцювальних системах виготовлення інтегральних

обкладинок для книжково-журнальної продукції. Зміцнювальний мікрорельєф створювався двома технологічними підходами [127, 128]:

- лазерним формуванням мікрорельєфних напрямних на поверхні зразків;
- механічним вдавлюванням індентором із напівсферичним наконечником із алмазного композиційного термостійкого матеріалу АКТМ+.

1. Матеріали та геометрія зразків

Як модельні зразки використовували сталеві пластини марок 05кп та 08Х18Н10Б розмірами $100 \times 20 \times 2$ мм, наближеними до геометрії робочих елементів профільних планок. Сталь 05кп належить до конструкційних низьковуглецевих сталей з високою пластичністю та сприятливістю до зернодроблення, тоді як 08Х18Н10Б є аустенітною корозійностійкою сталлю зі стабілізацією титану, підвищеною твердістю та структурною стабільністю. Основні механічні та структурні характеристики сталей (границя плинності, міцність на розрив, відносне видовження, модуль Юнга, мікротвердість, тип структури, фазова стабільність) узагальнено у відповідній таблиці та враховано при аналізі результатів зміцнення [127].

Такий вибір матеріалів дозволяє порівняти поведінку низьковуглецевої феритно-перлітної сталі та аустенітної корозійностійкої сталі при формуванні мікрорельєфного шару, а також оцінити вплив вихідної структури й твердості на ефективність зміцнення.

2. Лазерне формування мікрорельєфних напрямних

Для нанесення мікрорельєфних напрямних на зразки зі сталей 05кп та 08Х18Н10Б застосовували волоконний лазер «ГЕНЕРАТОР Г-Ом-16-1» (Україна). Лазер працює на довжині хвилі 1064 нм (інфрачервоний діапазон), має максимальну вихідну потужність до 500 Вт, підтримує безперервний та імпульсний режими з частотою до 20 кГц, тривалістю імпульсу 10–200 нс та енергією імпульсу до 1 мДж. Діаметр фокусованої плями лежить у межах 30–100 мкм, що дозволяє формувати мікрорельєфні елементи з контрольованими розмірами та кроком [127].

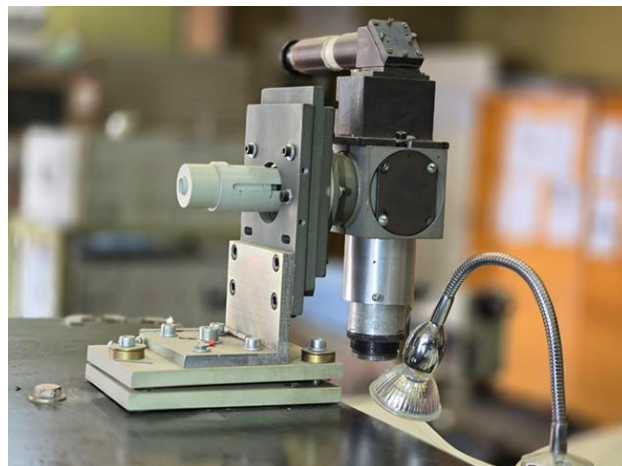


Рисунок 4.2.1. Лазерний генератор та експериментальна установка для формування зміцнювального мікрорельєфу на робочих поверхнях деталей фальцапарату

Під час експериментів варіювалися основні параметри лазерної обробки (потужність, швидкість сканування, щільність енергії, частота імпульсів), що дозволило отримати серії зразків із різними геометричними та фізико-механічними характеристиками мікрорельєфного шару.

3. Механічне формування мікрорельєфу індентором з АКТМ+

Механічне мікрорельєфне зміцнення здійснювалося на спеціалізованому стенді, який забезпечував стабільне вдавлювання індентора та контрольоване переміщення зразка (рис. 4.2.2) [127].

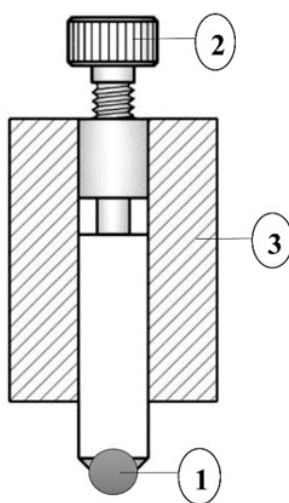


Рис. 4.2.2. Фрагмент схеми механізму індентора: 1 – сферичний індентор, 2 – механізм регулювання зусилля, 3 – напрямні переміщення.

Як інструмент використовували індентор із сферичним наконечником, армованим алмазним композиційним термостійким матеріалом підвищеної зносостійкості (АКТМ+), отриманим шляхом спікання алмазних мікропорошків із додаванням n-шарових графенів (0,01–0,30 %). Така структура наконечника знижує тертя та налипання матеріалу й забезпечує стабільну форму канавок мікрорельєфу [127].

Стенд дозволяв реалізувати:

- постійні значення зусилля вдавлювання: 50, 100 та 150 Н;
- контрольовану швидкість лінійного переміщення пластини від 0,1 до 10 мм/с;
- рух зразка вздовж фіксованого індентора, що забезпечувало формування протяжних мікрорельєфних напрямних.

Формовані профілі рельєфу реєстрували в поперечному перерізі для відстеження змін глибини при зміні швидкості й зусилля вдавлювання [127].

4.Методи контролю та вимірювальні прилади

Для комплексної оцінки структури, мікрорельєфу та фізико-механічних властивостей зміцнених шарів застосовували сукупність контактних, оптичних та електронно-мікроскопічних методів, а також методи мікротвердометрії й рентгенофазового аналізу [127].

Основні методи контролю та обладнання [127]:

– Контактна профілометрія (Mitutoyo Surftest SJ-410) – для реєстрації поперечних профілограм мікрорельєфних напрямних, визначення глибини й ширини канавок, побудови 2D- та 3D-моделей рельєфу (рис. 4.2.3).

– Мікротвердометрія (метод Віккерса) – для вимірювання мікротвердості приповерхневих шарів і зміцненої зони. Використовували мікротвердомір (MicroMet 5104) з навантаженнями 50–350 г, що дозволяло оцінити розподіл твердості по глибині та ширині напрямних (рис. 4.2.3). Враховуючи обмежену товщину зміцненого поверхневого мікрорельєфного шару та локальний характер зміцнення, для визначення твердості застосовано метод мікротвердості Віккерса.

– Порівняно з макрометадами вимірювання твердості (Роквелла, Брінелля), що характеризуються значною глибиною проникнення індентора та формують інтегральну оцінку властивостей матеріалу, метод Віккерса забезпечує локальне вимірювання з контрольованою глибиною вдавлювання, що дозволяє коректно оцінити властивості саме поверхневого зміцненого шару [127].



Рис. 4.2.3. Вимірювальне обладнання для оцінювання параметрів мікрорельєфу та механічних властивостей приповерхневих шарів: профілометр Mitutoyo SurfTest SJ-410 та мікротвердомір MicroMet 5104

– Оптична металографія (мікроскоп Olympus GX51) – для аналізу мікроструктури та виявлення зон пластичної деформації, зміни розміру зерна, наявності дефектів (рис. 4.2.4).

– Сканувальна електронна мікроскопія (SEM) з енергодисперсійною спектроскопією (EDS) – для детального дослідження поверхневої структури мікрорельєфу, стану приповерхневого шару й розподілу елементів (модель TESCAN VEGA 3) (рис. 4.2.4).

– Рентгенофазовий аналіз (XRD) (DRON-4M) – для виявлення можливих фазових перетворень у сталі AISI 347 (зокрема утворення мартенситних включень) після зміцнювальної обробки.



Рисунок 4.2.4. Лабораторне обладнання для мікроструктурних та морфологічних досліджень поверхні матеріалів: оптичний (металографічний) мікроскоп Olympus GX51 і сканувальний електронний мікроскоп TESCAN VEGA 3

Отримані експериментальні дані (профілограми, мікротвердість, мікроструктура, фазовий склад) обробляли з використанням математичних залежностей, узгоджених із моделями розділу 3.

Зокрема, аналізувались експоненційні залежності глибини та ширини мікрорельєфних елементів від швидкості переміщення й зусилля вдавлювання, будувалися 2D- та 3D-карти зміцнення по ширині й глибині, а також виконувалась порівняльна оцінка ефективності зміцнення для сталей 05кп та 08Х18Н10Б при різних режимах лазерного та механічного впливу .

Такий інтегрований підхід до вибору матеріалів, обладнання та методів забезпечує можливість комплексної оцінки процесів формування зміцнювального мікрорельєфу та їх узгодження з результатами математичного моделювання напружено-деформованого стану профільних фальцювальних планок.

4.3. Експериментальні результати дослідження лазерного формування зміцнювального мікрорельєфу профільних фальцювальних планок

Як показано в розділах 2 та 3, однорідність розподілу контактного тиску та стабільність тертя в зоні взаємодії «планка – клапан обкладинки» істотно залежать від параметрів зміцнювального мікрорельєфу робочої поверхні профільних фальцювальних планок.

Одним із перспективних способів формування керованого мікрорельєфу є локальне лазерне зміцнення, яке поєднує модифікацію мікроструктури приповерхневого шару зі створенням регулярних мікроканалов, що виконують функцію напрямних.

У цьому підрозділі наведено результати експериментальних досліджень лазерного формування зміцнювальних мікрорельєфних напрямних на зразках і фрагментах профільних фальцювальних планок зі сталей 05кп та 08Х18Н10Б.

Аналізуються геометричні параметри мікрорельєфу, зміна мікротвердості й мікроструктури приповерхневого шару, а також оцінюються триботехнічні характеристики й прогнозована зносостійкість робочої поверхні планок.

4.3.1. Серії зразків та режими лазерного зміцнення

Експериментальні дослідження проводилися на зразках зі сталей 05кп та 08Х18Н10Б розмірами $100 \times 20 \times 2$ мм (див. п. 4.2), що моделюють робочі ділянки профільних фальцювальних планок. Лазерне формування мікрорельєфу здійснювали на волоконному лазері з довжиною хвилі 1064 нм у імпульсному режимі. Варіювали середню потужність випромінювання $P = 150\text{--}350$ Вт, швидкість сканування $v = 350\text{--}600$ мм/с, частоту імпульсів $f = 80\text{--}90$ кГц, крок між сусідніми треками/канавками $s = 0,08\text{--}0,15$ мм (80–150 мкм) та кількість проходів по одній траєкторії $n_{\text{pass}} = 1\text{--}2$ (табл. 4.3.1) [127]. На основі комбінації цих параметрів було сформовано серії зразків:

- серія L1–L_k для сталі 05кп (різні режими потужності та швидкості);

– серія $L'1-L'_m$ для сталі 08X18H10Б (окремо підібрані режими з урахуванням вищої корозійної стійкості та аустенітної структури).

Таблиця 4.3.1.

Серії зразків та режими лазерного формування мікрорельєфу

Позначення серії	Марка сталі	Потужність лазера P , Вт	Швидкість сканування v , мм/с	Частота імпульсів f , кГц	Крок між треками s , мм	Кількість проходів n_{pass}
L1	05кп	150	600	80	0,15	1
L2	05кп	200	500	80	0,12	1
L3	05кп	250	400	80	0,10	2
L4	05кп	300	350	80	0,08	2
L'1	08X18H10Б	200	600	90	0,15	1
L'2	08X18H10Б	250	500	90	0,12	1
L'3	08X18H10Б	300	450	90	0,10	2
L'4	08X18H10Б	350	400	90	0,08	2

Для кожної серії режимів обробки виготовляли не менше 5 зразків зі сталі 05кп та не менше 8 зразків зі сталі 08X18H10Б, що забезпечило можливість статистичної обробки експериментальних результатів і оцінювання варіацій геометричних параметрів мікрорельєфу та мікротвердості поверхневого шару.

4.3.2. Геометричні характеристики та дефекти мікрорельєфних напрямних

Для дослідження геометричних характеристик і можливих дефектів мікрорельєфних напрямних на робочих поверхнях фальцювальних планок було реалізовано експериментальний процес їх формування з використанням лазерної обробки [125, 126].

На наведених далі фотографіях показано експериментальну установку та безпосередній процес лазерного формування зміцнювального мікрорельєфу, які слугували основою для подальшого профілометричного й мікроскопічного аналізу параметрів мікрорельєфу.



Рис. 4.3.1. Експериментальна установка для технологічного процесу лазерного формування зміцнювального мікрорельєфу на поверхні металевих планок



Рис. 4.3.2. Процес лазерного формування зміцнювального мікрорельєфу на поверхні металевих планок

Після лазерної обробки поверхню зразків аналізували за допомогою профілометрії та 3D-оптичної мікроскопії. Для кожного режиму визначали

середню глибину мікроканалов h_r , їхню ширину на рівні середньої лінії профілю b_r , крок між елементами мікрорельєфу s , а також параметри шорсткості R_a , R_z і показники форми профілю. Геометричні параметри мікрорельєфних напрямних на робочій поверхні фальцювальних планок задавали відповідно до результатів математичного моделювання (розділ 3) і схеми, наведеної на рис. 4.3.3, де показано розташування напрямних та їхні основні параметри (глибина, ширина, довжина) [127].

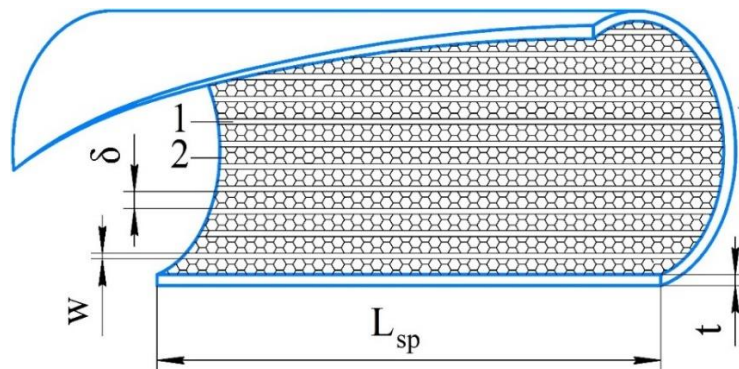


Рис. 4.3.3. Схема профільної фальцювальної пластини зі зміцнювальним мікрорельєфом робочої поверхні та мікрорельєфними напрямними: 1 – мікрорельєфні напрямні; 2 – зміцнювальний мікрорельєф; t – товщина, w – ширина, δ – зміщення, L_{sp} – довжина мікрорельєфних напрямних [127].

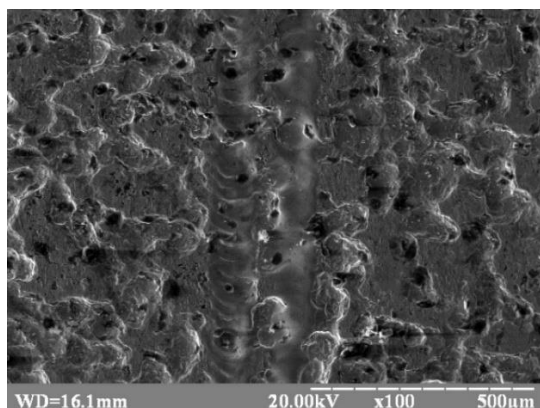
За результатами аналізу встановлено, що зі збільшенням потужності лазера при фіксованій швидкості сканування:

- глибина мікроканалов h_r зростає від $h_{r,min}$ до $h_{r,max}$ мкм;
- ширина b збільшується, при цьому форма профілю переходить від близької до V-подібної до більш плоскої або з елементами оплавлення;
- шорсткість у межах канавок зростає, а на гребенях між канавками формується зональний рельєф зі змінною висотою [127].

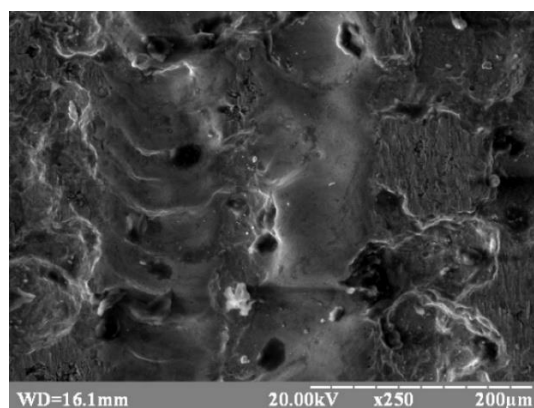
Для недостатньої потужності $P < P_{кр,1}$ спостерігається неглибокий рельєф з $h_r < h_{пор}$, який може бути згладжений у процесі фальцювання. Для надмірної потужності $P > P_{кр,2}$ та/або зниженої швидкості $v < v_{кр}$ виникають характерні дефекти мікрорельєфу: локальне оплавлення й опуклі валики металу по краях

канавок, мікротріщини в приповерхневому шарі (особливо для сталі 05кп), «змазування» профілю з утворенням кратерів та підплавів [127].

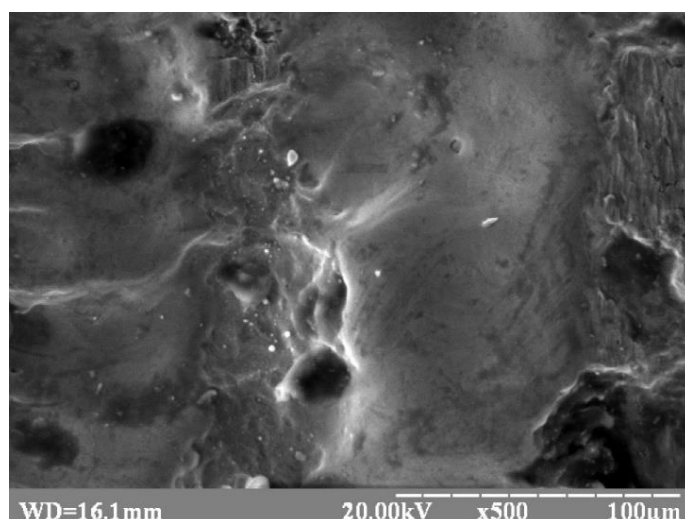
Такі дефектні ділянки та характер сформованого мікрорельєфу проілюстровано на SEM-зображеннях та результатах EDS-аналізу для сталей 08X18H10Б і 05кп (рис. 4.3.4–4.3.5) [127].



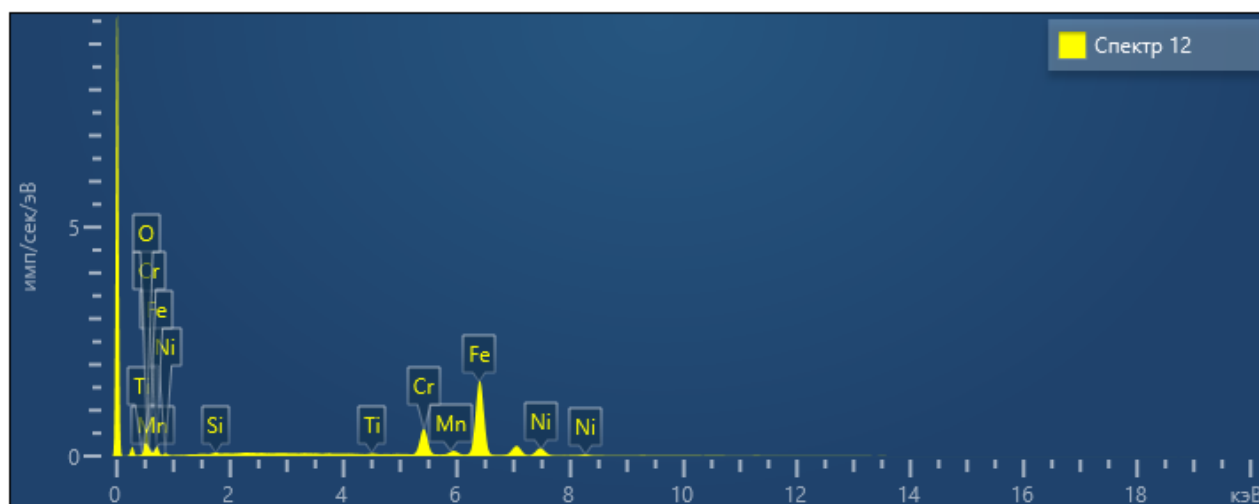
a



b



c



d

Спектр 12				
Елемент	Тип спектральної лінії	Масова частка, %	Похибка масової частки (σ), %	Атомна частка, %
Ti	K-серія	0,43	0,11	0,40
Cr	K-серія	13,98	0,29	12,01
Mn	K-серія	0,37	0,22	0,30
Fe	K-серія	65,43	0,52	52,34
Ni	K-серія	9,79	0,39	7,45
Si	K-серія	0,34	0,10	0,54
O	K-серія	9,66	0,36	26,96
Разом	—	100,00	—	100,00

Рис. 4.3.4. SEM зображення (a, b, c) точкового мікрорельєфу та результати EDS-аналізу (спектр 12) (d) шару лазерного зміцнення поверхні фальцювальних планок зі сталі 08X18H10Б

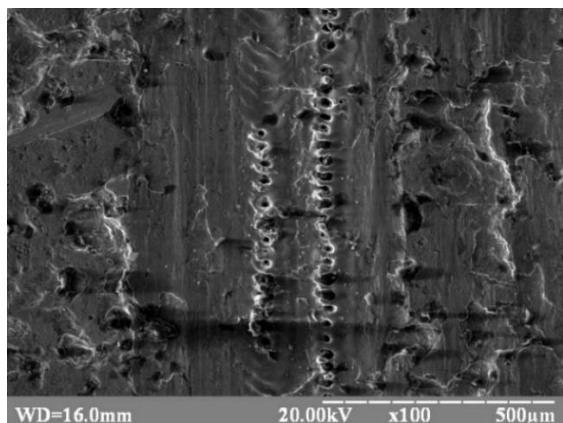
SEM-зображення точкового мікрорельєфу на поверхні фальцювальної планки зі сталі 08X18H10Б (рис. 4.3.4, a–e) демонструють формування регулярної системи осесиметричних кратерів зі сталою геометрією (діаметр і глибина в межах малих локальних відхилень), що свідчить про відтворюваність результатів лазерної обробки у відібраному діапазоні режимів [127].

У зонах локального перегріву та повторного плавлення спостерігаються оплавлені краї кратерів, мікротріщини й ділянки нерівномірного затвердіння, які можуть виступати концентраторами напружень та ініціювати прискорене зношування в умовах контакту «фальцювальна планка – матеріал обкладинки». З метою уточнення можливих структурно-хімічних змін у цих зонах додатково виконано EDS-аналіз (спектр 12) з представленням результатів у табл. 4.3.4 [127].

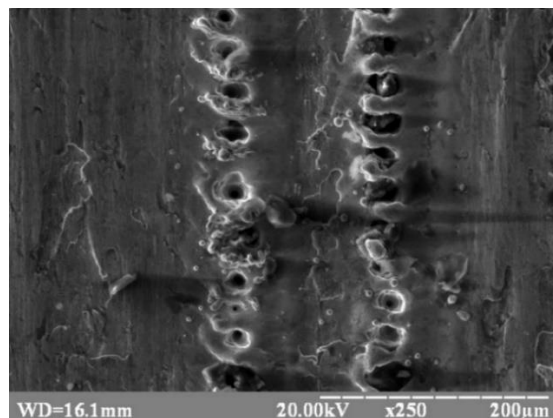
Кількісний елементний аналіз поверхні виконано методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDS) з використанням характеристичних ліній K-серії. Спектр отримано в точці на краю кратера мікрорельєфу; кількість вимірювань – $n = 5$. За даними EDS (рис. 4.3.4, d; табл. 4.3.4) у зоні вимірювання основними компонентами є Fe (65,43 мас.%), Cr (13,98 мас.%) та Ni (9,79 мас.%), що узгоджується з типовим складом сталі

08X18H10Б. Наявність Ti (0,43 мас.%) відповідає стабілізованому складу сталі, тоді як Mn і Si присутні у малих кількостях [127].

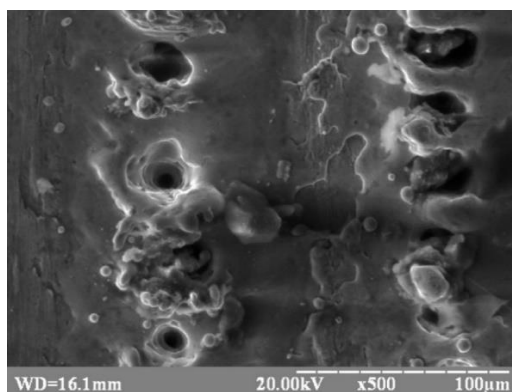
Виявлення кисню (9,66 мас.%) свідчить про формування оксидних утворень/окиснення поверхні в зоні кратерів (локально), що може впливати на умови тертя в контакті «фальцювальна планка – клапан обкладинки» та має враховуватися при виборі режимів лазерного зміцнення поверхні фальцювальних планок [127].



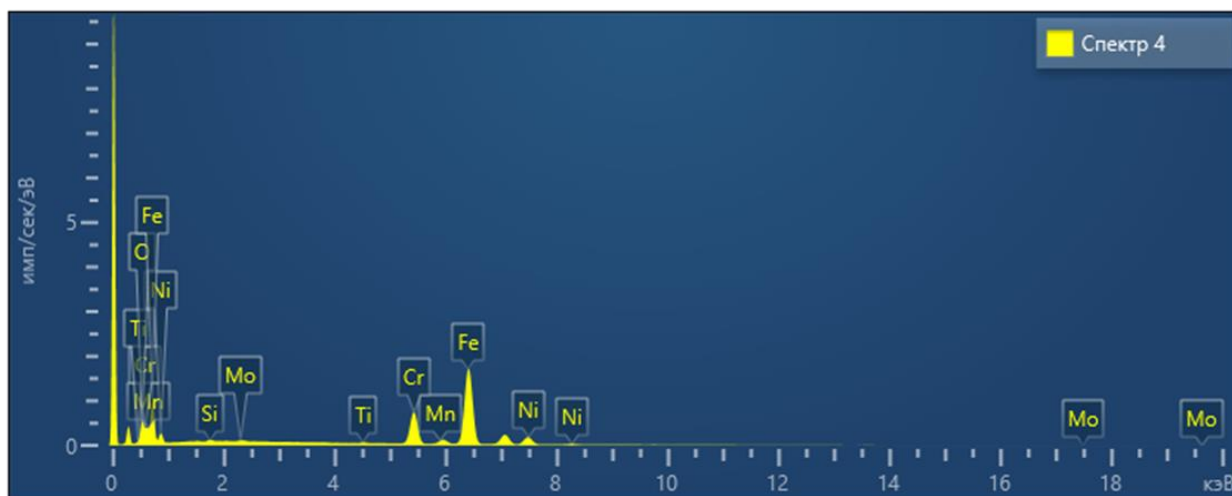
a



b



c



d

Спектр 4				
Елемент	Тип спектральної лінії	Масова частка, %	Похибка масової частки (σ), %	Атомна частка, %
Ti	К-серія	0,38	0,09	0,38
Cr	К-серія	16,68	0,27	15,11
Mn	К-серія	0,20	0,18	0,17
Fe	К-серія	64,72	0,48	54,60
Ni	К-серія	10,15	0,33	8,15
Si	К-серія	0,43	0,10	0,72
O	К-серія	7,02	0,34	20,67
Разом	—	100,00	—	100,00

Рис. 4.3.5. SEM зображення (*a, b, c*) мікрорельєфних напрямних та результати EDS-аналізу (спектр 4) (*d*) шару лазерного зміцнення поверхні фальцювальних планок зі сталі 08X18H10Б [127]

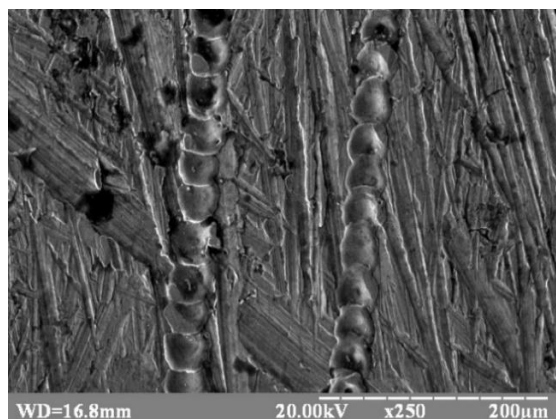
SEM-зображення лінійних мікрорельєфних напрямних на сталі 08X18H10Б (рис. 4.3.5, *a–в*) підтверджують формування протяжних канавок зі сталою шириною та кроком у центральній частині треку й появу зон оплавлення та напливів металу на краях при перевищенні критичних значень потужності або зниженні швидкості сканування [127].

У таких зонах фіксуються локальні підвищення шорсткості й пористості, що потенційно призводить до нерівномірного розподілу контактного тиску вздовж напрямних. EDS-спектр (рис. 4.3.5, *d*) показує стабільний вміст хрому (≈ 16 – 17 мас. %), нікелю (~ 8 – 10 мас. %) і слідову кількість молібдену, що узгоджується з типовим складом корозійностійкої сталі 08X18H10Б, а також підвищену частку кисню в зонах оплавлення [127].

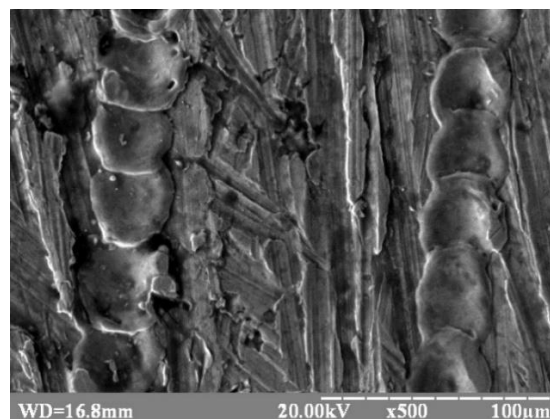
Це вказує на інтенсивніше оксидоутворення в термічно навантажених ділянках і може бути пов'язано з локальними змінами фізико-механічного стану поверхні. Таким чином, SEM/EDS-аналіз дозволяє окреслити діапазон режимів, за яких забезпечується формування регулярного лінійного мікрорельєфу без критичних дефектів [127].

SEM-зображення мікрорельєфних напрямних і точкового рельєфу на поверхні фальцювальних планок з вуглецевої сталі 05кп (рис. 4.3.6, 4.3.7) демонструють переважання пластичної деформації матеріалу з формуванням

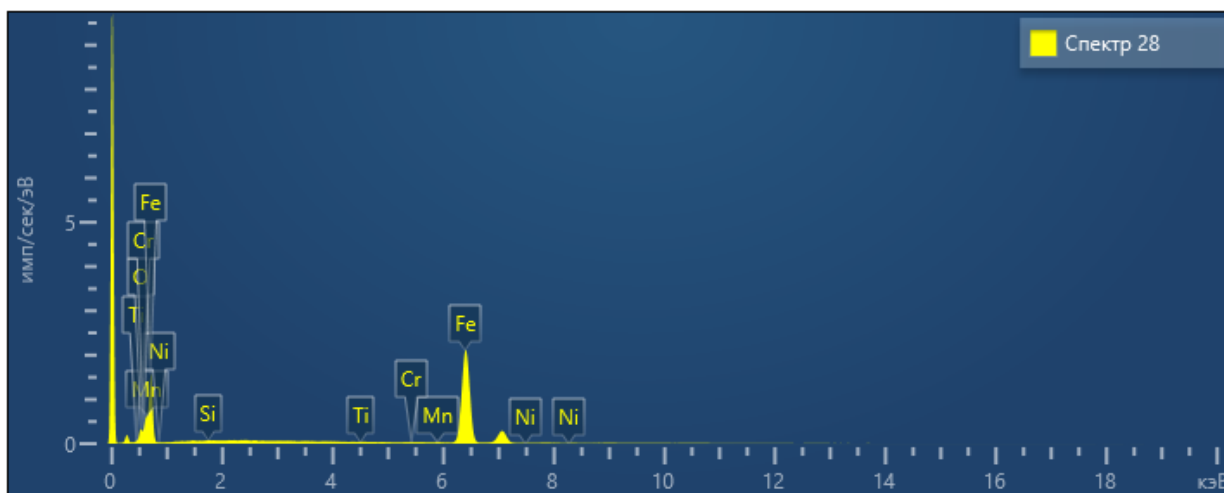
канавок і лунок без розвитку суцільної зони повторного плавлення. За помірних режимів лазерної обробки сформований мікрорельєф характеризується відносно гладкими стінками канавок і відсутністю розгалуженої сітки мікротріщин, що свідчить про реалізацію механізмів деформаційного зміцнення у приповерхневому шарі [127].



a



b



c

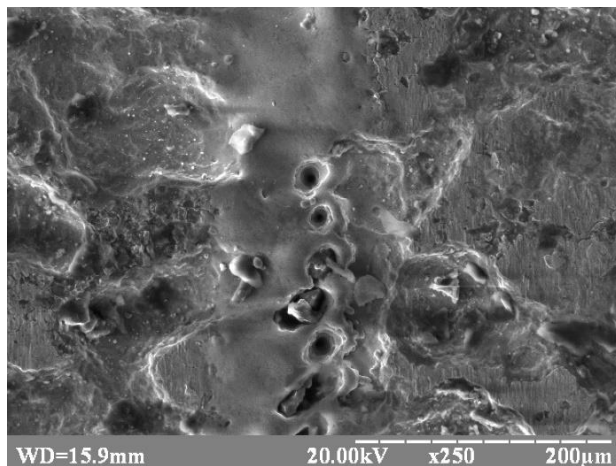
Спектр 28				
Елемент	Тип спектральної лінії	Масова частка, %	Похибка масової частки (σ), %	Атомна частка, %
Ti	К-серія	0,06	0,14	0,06
Cr	К-серія	0,00	0,14	0,00
Mn	К-серія	0,33	0,20	0,29
Fe	К-серія	93,78	0,61	82,17
Ni	К-серія	0,10	0,28	0,09
Si	К-серія	0,10	0,15	0,18
O	К-серія	5,63	0,48	17,21
Разом	—	100,00	—	100,00

Рис. 4.3.6. SEM зображення (a, b) мікрорельєфних напрямних та результати EDS-аналізу (спектр 28) (c) шару лазерного зміцнення поверхні фальцювальних планок зі сталі 05кп

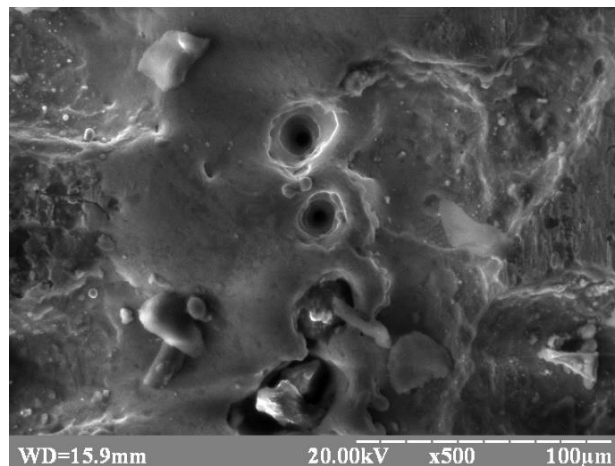
Підвищення потужності випромінювання та зменшення швидкості сканування призводять до локального перегріву, внаслідок чого на окремих ділянках фіксуються напливи матеріалу, кратери й зони часткового оплавлення, що вказує на перевищення температури плавлення у приповерхневому шарі сталі 05кп [127].

З метою уточнення структурно-хімічних змін у цих зонах виконано EDS-аналіз (спектр 28), результати якого наведено на рис. 4.3.6, c. За даними енергодисперсійної спектроскопії основним компонентом поверхневого шару є залізо (93,78 мас.%), що відповідає складу низьковуглецевої вуглецевої сталі. Наявність кисню (5,63 мас.%) свідчить про локальне окиснення поверхні, інтенсивність якого зростає в термічно навантажених ділянках, зокрема в зонах напливів і кратерів [127].

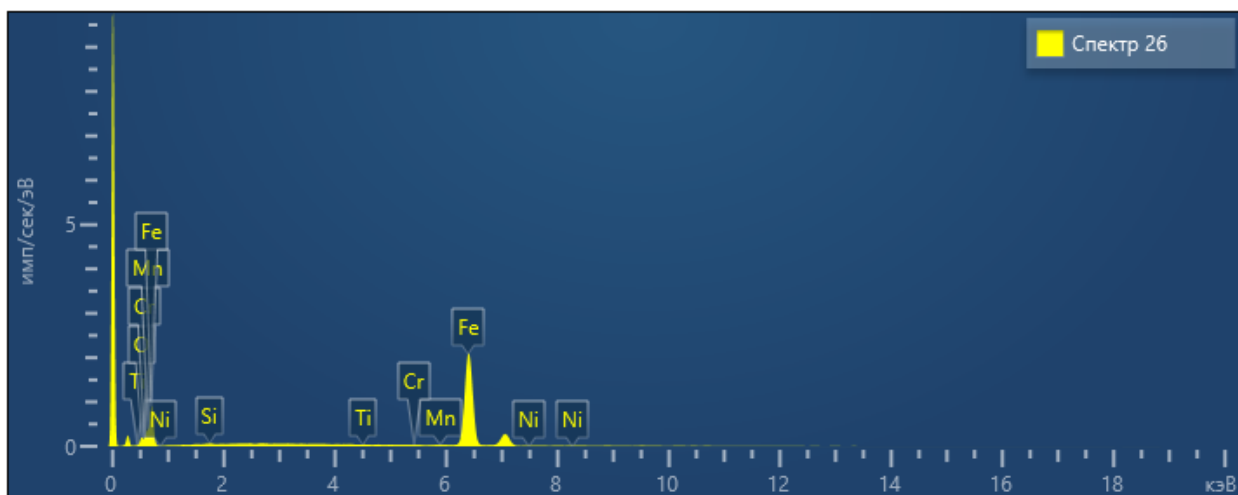
Відсутність легувальних елементів у значущих концентраціях (Cr, Ni) зумовлює меншу термічну стабільність і схильність сталі 05кп до інтенсивнішого оксидування порівняно з корозійностійкою сталлю 08X18H10B. Це необхідно враховувати при виборі режимів лазерної обробки, оскільки надмірне оплавлення та оксидні утворення можуть негативно впливати на рівномірність контактної взаємодії та зносостійкість фальцювальних планок у процесі експлуатації [127].



a



b



с

Спектр 26				
Елемент	Тип спектральної лінії	Масова частка, %	Похибка масової частки (σ), %	Атомна частка, %
Ti	К-серія	0,15	0,12	0,16
Cr	К-серія	0,03	0,13	0,03
Mn	К-серія	0,17	0,19	0,16
Fe	К-серія	95,56	0,51	87,16
Ni	К-серія	0,17	0,25	0,14
Si	К-серія	0,12	0,12	0,21
O	К-серія	3,81	0,35	12,14
Разом		100,00		100,00

Рис. 4.3.7. SEM зображення (a, b) точкового мікрорельєфа та результати EDS-аналізу (спектр 26) (с) шару лазерного зміцнення поверхні фальцювальних планок зі сталі 05кп [127]

EDS-аналіз (рис. 4.3.6, 4.3.7) підтверджує домінування заліза (понад 93 мас. %) за наявності незначної кількості марганцю та слідів хрому і нікелю, а також фіксує вміст кисню на рівні кількох масових відсотків, що вказує на поверхневе окиснення та наявність оксидних утворень у зоні мікрорельєфу. Відсутність легувальних елементів, характерних для сталі 08X18H10Б, зумовлює нижчу корозійну стійкість, водночас формування рельєфу в сталі 05кп відбувається переважно за рахунок пластичної деформації, що може зменшувати схильність до утворення крихких термічних тріщин за раціональних режимів обробки [127].

Порівняння зі сталлю 08X18H10Б показує, що для 05кп основні дефекти пов'язані переважно з локальним перегрівом та напливами металу, тоді як на оптимальних режимах формується рельєф, більш придатний до сприйняття циклічних контактних навантажень без розвитку глибоких тріщин [127].

Оптимальним для подальшого використання у фальцювальних планках є діапазон режимів, за якого забезпечується стабільна глибина мікрорельєфу $h_r \approx h_{opt}$, крок s відповідає умовам формування спрямованих напрямних тертя, а дефекти оплавлення та мікротріщин відсутні або мінімальні [127].

4.3.3. Вплив лазерного формування на мікротвердість і мікроструктуру приповерхневого шару

Для кількісної оцінки зміцнювального ефекту, що проявляється у зміні твердості поверхневого шару пластин із корозійностійкої та конструкційної сталей після обробки, застосовано метод мікротвердості за Віккерсом із малими навантаженнями (HV0.01–HV0.2), який є нормативно регламентованим і загальноприйнятим для аналізу локальних властивостей поверхневих зміцнених зон.

Метод ґрунтується на вдавлюванні в досліджувану поверхню алмазного індентора у вигляді чотиригранної піраміди з кутом між протилежними гранями 136° та подальшому вимірюванні діагоналей утвореного відбитка, за якими мікротвердість визначається відповідно до стандартної формули Віккерса [127].

Зазначений метод є універсальним і коректним як для низьковуглецевих сталей (05кп, DC01), так і для аустенітних корозійностійких сталей типу 08X18H10Б, а також для аналізу поверхневих зміцнених шарів. Завдяки високій просторовій роздільній здатності він дозволяє оцінювати локальні зміни твердості у тонких приповерхневих зонах товщиною від десятків до сотень мікрометрів, що є принципово важливим при дослідженні ефектів лазерного зміцнення, механічного зміцнення індентором та формування мікрорельєфу [127].

Вимірювання мікротвердості виконували відповідно до вимог стандарту ДСТУ ISO 6507-1:2019 «Матеріали металеві. Визначення твердості за Віккерсом. Частина 1. Метод випробування».

Для пластин після зміцнення застосовували навантаження в діапазоні HV0.05–HV0.2, при цьому навантаження HV0.1 обрано як оптимальний компроміс між локальністю вимірювання та стабільністю результатів; у межах одного експерименту використовувався єдиний режим навантаження [127].

Отримані залежності мікротвердості добре узгоджуються з результатами SEM/EDS-аналізу поверхні, наведеними в п. 4.3.4 (рис. 4.3.4–4.3.7). Для сталі 08X18H10Б підвищені значення твердості приповерхневого шару пов'язані з формуванням дрібнодисперсної структури та локальним збагаченням хромом і нікелем у зонах лазерного впливу, що підтверджується спектральним аналізом.

У сталі 05кп зміцнення має переважно дислокаційний характер із розвитком зон пластичної деформації без суттєвої зміни хімічного складу, що зумовлює більш плавне зниження мікротвердості з глибиною, але й дещо менший потенціал підвищення зносостійкості порівняно з легованою сталлю.

Таким чином, структурно-фазові перетворення, виявлені за даними SEM/EDS, дають можливість інтерпретувати криві розподілу мікротвердості та пов'язати їх з реальним станом приповерхневого шару фальцювальних планок [127].

Для сталі 08X18H10Б підвищена твердість приповерхневого шару пов'язана з утворенням дрібнодисперсної структури та локальним збагаченням хромом і нікелем у зонах лазерного впливу, що фіксується за результатами спектрального аналізу [127].

У сталі 05кп зміцнення носить переважно дислокаційний характер, з формуванням зон пластичної деформації без суттєвої зміни хімічного складу; це забезпечує більш плавний спад мікротвердості з глибиною, але й менший потенціал підвищення зносостійкості порівняно з легованою сталлю [127].

Таким чином, SEM/EDS-дослідження дозволяють інтерпретувати отримані криві мікротвердості з урахуванням реального стану приповерхневого шару. Результати вимірювань твердості фальцювальних планок узагальнено в табл. 4.3.2, де наведено вибірку значень HV для різних навантажень та типів планок [127].

Таблиця 4.3.2.

Вибірка результатів вимірювань твердості фальцювальних планок

№	Навантаження, г	Твердість (планка 1– 08X18Н10Б), МПа	Твердість (планка 2– 05кп), МПа
1	50	4904	2141
2	100	4607	2086
3	150	4280	2035
4	200	3954	1983
5	250	3736	1892
6	300	3488	1766
7	300	3646	1786
8	300	3982	1778
9	350	3088	1665

Графічне відображення змін твердості наведено на рис. 4.3.8, де показано порівняння твердості двох типів планок при різних навантаженнях індентора [127].

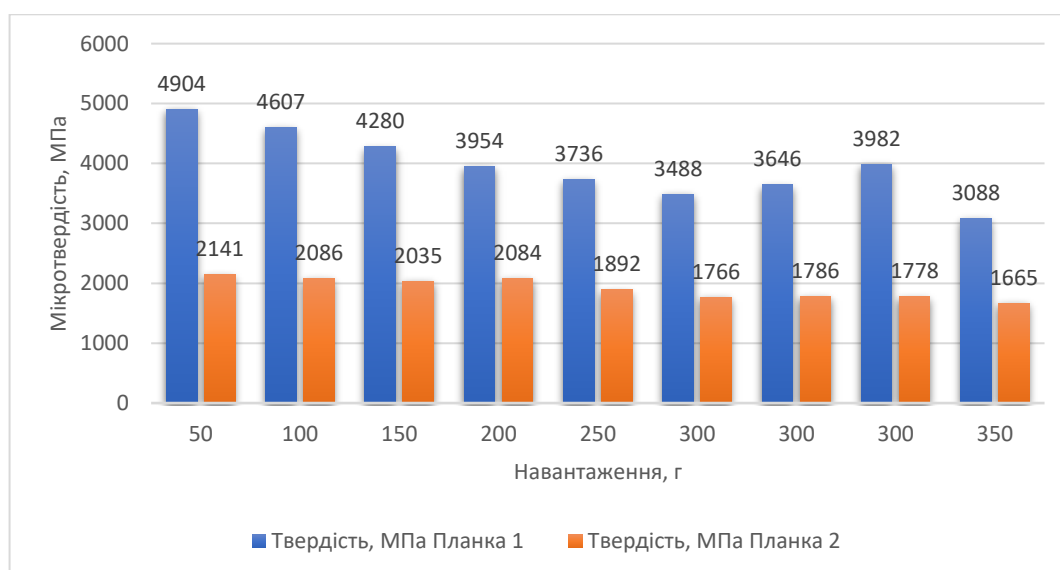


Рис. 4.3.8. Результати вимірювання твердості фальцювальних планок після лазерного зміцнення

За результатами досліджень встановлено [127], що:

- для сталі 05кп поверхнева мікротвердість зростає в середньому з $HV_{05кп,до}$ до $HV_{05кп,після}$, при цьому зона підвищеної твердості сягає глибини $Z_{05кп}$ мкм;

- для сталі 08X18H10Б приріст мікротвердості є більш вираженим – з $HV_{08X18H10Б,до}$ до $HV_{08X18H10Б,після}$, а зона зміцнення може досягати $Z_{08X18H10Б}$ мкм.

Результати вимірювань твердості фальцювальних планок свідчать, що планки з нержавіючої сталі 08X18H10Б (планка 1) характеризуються вищими значеннями початкової твердості порівняно з вуглецевою сталлю 05кп (планка 2) [127].

Згідно з даними таблиці 4.3.2, твердість сталі 08X18H10Б знаходиться в діапазоні 4904–3088 МПа при навантаженні 50–350 г, а відносне відхилення становить 37,1 %. Для 05кп за тих самих навантажень твердість змінюється в межах 2141–1665 МПа з відхиленням 22,3 %, що вказує на вищу стабільність цього показника [127].

Підвищена твердість сталі 08X18H10Б забезпечує потенційно більшу зносостійкість порівняно зі сталлю 05кп, однак більш значне зниження твердості зі збільшенням навантаження вказує на необхідність урахування впливу пластичної деформації під час експлуатації. Вищу стабільність твердості 05кп за різних навантажень можна розглядати як перевагу для умов тривалого або циклічного навантаження фальцювальних планок у виробничому процесі [127].

Металографічний та SEM-аналіз підтверджують формування зміцненого приповерхневого шару та зміну характеру мікрорельєфу для обох сталей. Для сталі 08X18H10Б на SEM-зображеннях (рис. 4.3.4–4.3.5, а–д) спостерігається формування протяжних мікрорельєфних напрямних та зміна елементного складу поверхні, тоді як для сталі 05кп (рис. 4.3.6–4.3.7, а–с) домінує пластична деформація та перерозподіл карбідних включень без суттєвих фазових перетворень [127].

Експериментально отримані профілі твердості та структури узгоджуються з результатами математичного моделювання напружено-деформованого стану (розділ 3) і підтверджують доцільність застосування лазерного зміцнення для формування поверхневого шару заданої товщини й мікротвердості.

4.3.4. Трибологічні характеристики та прогнозована зносостійкість зміцненого шару

Оцінку трибологічних властивостей здійснювали на трибометричному стенді за схемою ковзання по контртілу, що моделює контакт «планка – матеріал обкладинки». Для кожного режиму обробки визначали коефіцієнт тертя μ (табл. 4.3.3) у стаціонарному режимі та умовний показник зносостійкості W , які формуються за результатами трибовипробувань для окремих режимів L1, L2.

Таблиця 4.3.3.

Значення коефіцієнта тертя μ , та умовного показника зносостійкості W для фальцювальних планок зі сталей 05кп та 08Х18Н10Б до та після лазерного зміцнення

№ зразка	Марка сталі	Стан поверхні	Режим обробки	Коефіцієнт тертя μ ,	Умовний показник зносостійкості W , відн. од.
1	05кп	вихідна шліфована поверхня	—	0,61	1,0
2	05кп	після лазерного зміцнення з мікрорельєфом	L2	0,49	1,9
3	08Х18Н10Б	вихідна шліфована поверхня	—	0,52	1,4
4	08Х18Н10Б	після лазерного зміцнення з мікрорельєфом	L'2	0,41	2,7

Як видно з даних табл. 4.3.3, лазерне формування зміцнювального мікрорельєфу призводить до істотного зниження коефіцієнта тертя для обох досліджуваних сталей.

Для сталі 05кп коефіцієнт тертя зменшується з 0,61 для вихідної шліфованої поверхні до 0,49 після лазерного зміцнення в режимі L2, тоді як для сталі 08X18H10Б – з 0,52 до 0,41 у режимі L'2. Це відповідає відносному зменшенню μ приблизно на 20–25 %, що безпосередньо сприяє зниженню сил тертя у зоні контакту «планка – клапан обкладинки» та зменшенню ризику неконтрольованого ковзання розгортки під час фальцювання.

Умовний показник зносостійкості W також демонструє суттєве зростання після лазерного зміцнення. Для сталі 05кп W збільшується з 1,0 (вихідний стан) до 1,9, а для сталі 08X18H10Б – з 1,4 до 2,7.

Таким чином, зміцнені планки зі сталі 08X18H10Б виявляють найкраще поєднання зниженого коефіцієнта тертя та підвищеної зносостійкості, що підтверджує доцільність їх застосування в якості робочих елементів фальцювальних механізмів.

Отримані результати узгоджуються з даними мікротвердості та структурного аналізу (п. 4.3.3) і свідчать про ефективність лазерного формування мікрорельєфу як інструмента керування триботехнічними характеристиками профільних фальцювальних планок (рис. 4.3.9, 4.3.10).

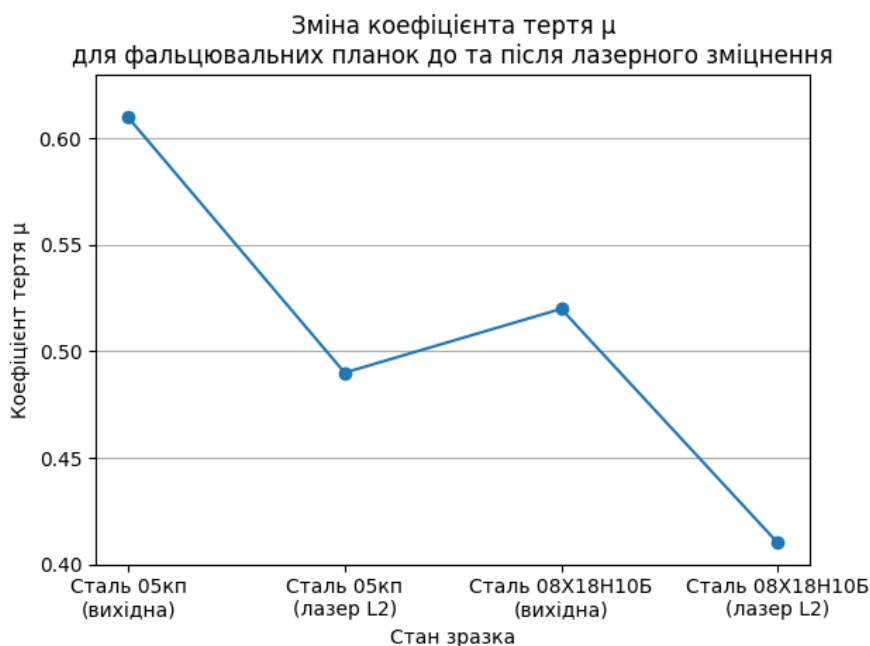


Рис. 4.3.9. Зміна коефіцієнта тертя μ для фальцювальних планок зі сталей 05кп та 08X18H10Б до та після лазерного зміцнення.

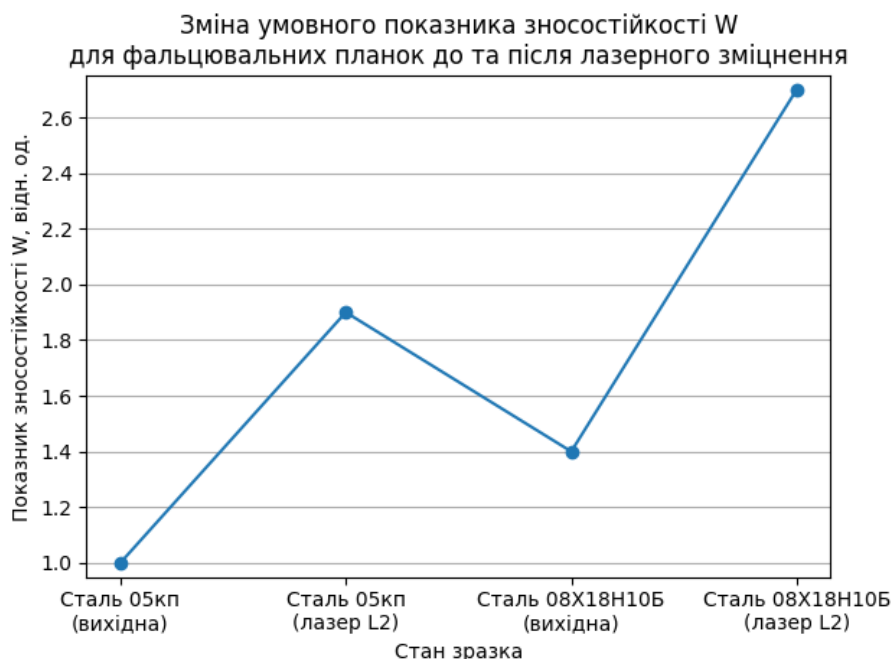


Рис. 4.3.10. Зміна умовного показника зносостійкості W фальцювальних планок зі сталей 05кп та 08Х18Н10Б до та після лазерного зміцнення.

Експериментальні дані свідчать, що лазерне формування мікрорельєфу знижує коефіцієнт тертя в середньому на $\Delta\mu$ відносних одиниць порівняно з вихідною шліфованою поверхнею, а умовний показник зносостійкості W зростає в k_w разів для сталі 05кп і в k'_w разів для сталі 08Х18Н10Б. Оптимальний режим лазерного зміцнення забезпечує поєднання зниженого коефіцієнта тертя із мінімізацією дефектів мікрорельєфу, що є першочерговим для стабільності процесу фальцювання при багаторазових циклах.

4.3.5. Узагальнення результатів лазерного зміцнення профільних фальцювальних планок

На основі проведених експериментальних досліджень лазерного формування зміцнювального мікрорельєфу можна зробити такі узагальнення:

1. Лазерне зміцнення дозволяє сформувати на робочій поверхні профільних планок керований мікрорельєф із заданою глибиною, кроком і формою елементів, що забезпечує спрямований розподіл контактних зусиль у зоні фальцювання інтегральних обкладинок.

2. Для сталей 05кп та 08X18H10Б виявлено діапазони режимів, за яких досягається істотне підвищення мікротвердості приповерхневого шару без утворення критичних дефектів (оплавлення, мікротріщини, розшарування), що підтверджено SEM- та EDS-дослідженнями.

3. Зростання мікротвердості та оптимізація геометрії мікрорельєфу супроводжуються зниженням коефіцієнта тертя і підвищенням умовної зносостійкості, що забезпечує збільшення ресурсу роботи профільних планок і стабільність процесу фальцювання.

4. Отримані експериментальні результати узгоджуються з теоретичними моделями розділу 3 і створюють підґрунтя для порівняння ефективності лазерного зміцнення з механічним формуванням мікрорельєфу індентором (підрозділ 4.4), а також для подальшої оптимізації технологічних параметрів зміцнення.

4.4. Локальне інденторне зміцнення профільних фальцювальних планок

4.4.1. Фізико-механічні особливості локального вдавлювання індентора

Розглянуто альтернативний варіант технологічного впливу – локальне вдавлювання сферичним індентором із композиційного матеріалу АКТМ+, який забезпечує механічне формування зміцнювальних мікрорельєфних напрямних на сталях 05кп та 08X18H10Б і дозволяє порівняти ефективність двох принципово різних методів зміцнення. Описано етапи зміцнення та відповідні механізми контактної взаємодії, які забезпечують зміну фізико-механічних властивостей приповерхневого шару матеріалу. На двох зразках пластин, виготовлених зі сталей 05кп та 08X18H10Б, були нанесені повздовжні зміцнювальні мікрорельєфні напрямні за допомогою індентора з наконечником, армованим алмазним композиційним термостійким матеріалом підвищеної зносостійкості (АКТМ+) [141].

У процесі мікрорельєфного зміцнення пластин, що реалізується шляхом вдавлювання індентора зі стабільним запрограмованим навантаженням під час переміщення пластини вздовж його поверхні, розвивається комплекс фізико-механічних явищ (рис. 4.4.1) [141]. Ці процеси можна умовно розподілити на кілька взаємопов'язаних рівнів контактної взаємодії, пластичної деформації, залишкових напружень, дислокаційного зміцнення та мікроструктурних змін.

У процесі вдавлювання сферичного індентора в металеву пластину виникає локалізоване контактне навантаження, зосереджене в обмеженій площі дотику [142, 145]. Внаслідок цього у приповерхневій зоні пластини формується осередок концентрованого напруженого стану, де домінує гідростатичний тиск.

Його величина значно перевищує межу плинності матеріалу, що призводить до втрати пружної рівноваги та ініціації пластичної деформації. У цій зоні спостерігається характерне сферичне розподілення контактного тиску з максимумом у центрі дотику, яке поступово зменшується до периферії. Саме ця напружена концентрація слугує тригером для активації внутрішніх мікромеханізмів зміцнення [141].

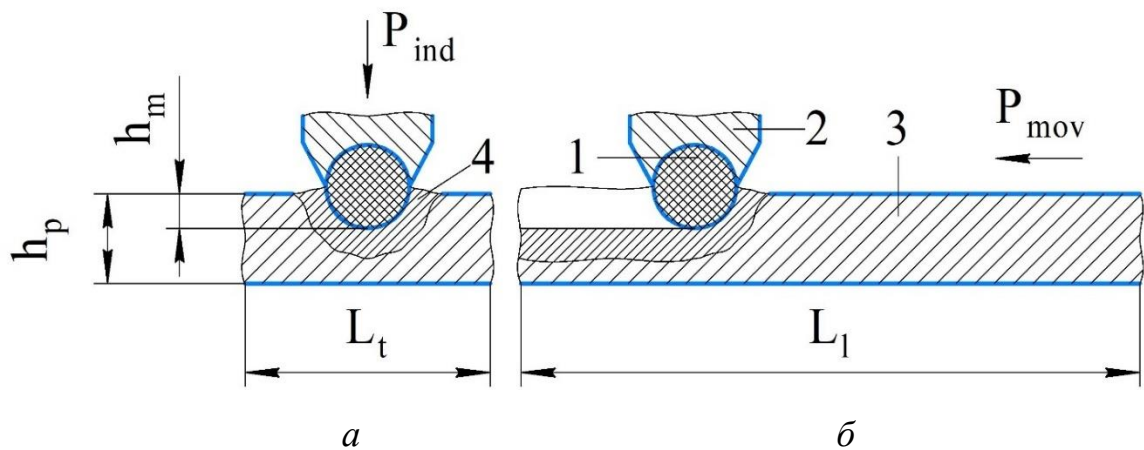


Рис. 4.4.1. Схема формування мікрорельєфних напрямних на робочій поверхні фальцювальної планки методом вдавлювання сферичного індентора: *а* – фрагмент поперечного перерізу мікрорельєфної напрямної; *б* – фрагмент поздовжнього перерізу мікрорельєфної напрямної; 1 – сферичний індентор; 2 – фрагмент тримача індентора; 3 – фрагмент фальцювальної

пластини; P_{ind} – зусилля вдавлювання індентора; P_{mov} – зусилля переміщення пластини; h_p – товщина пластини; h_m – глибина вдавлювання; L_t – довжина фрагмента поперечного перерізу пластини; L_l – довжина фрагмента поздовжнього перерізу пластини

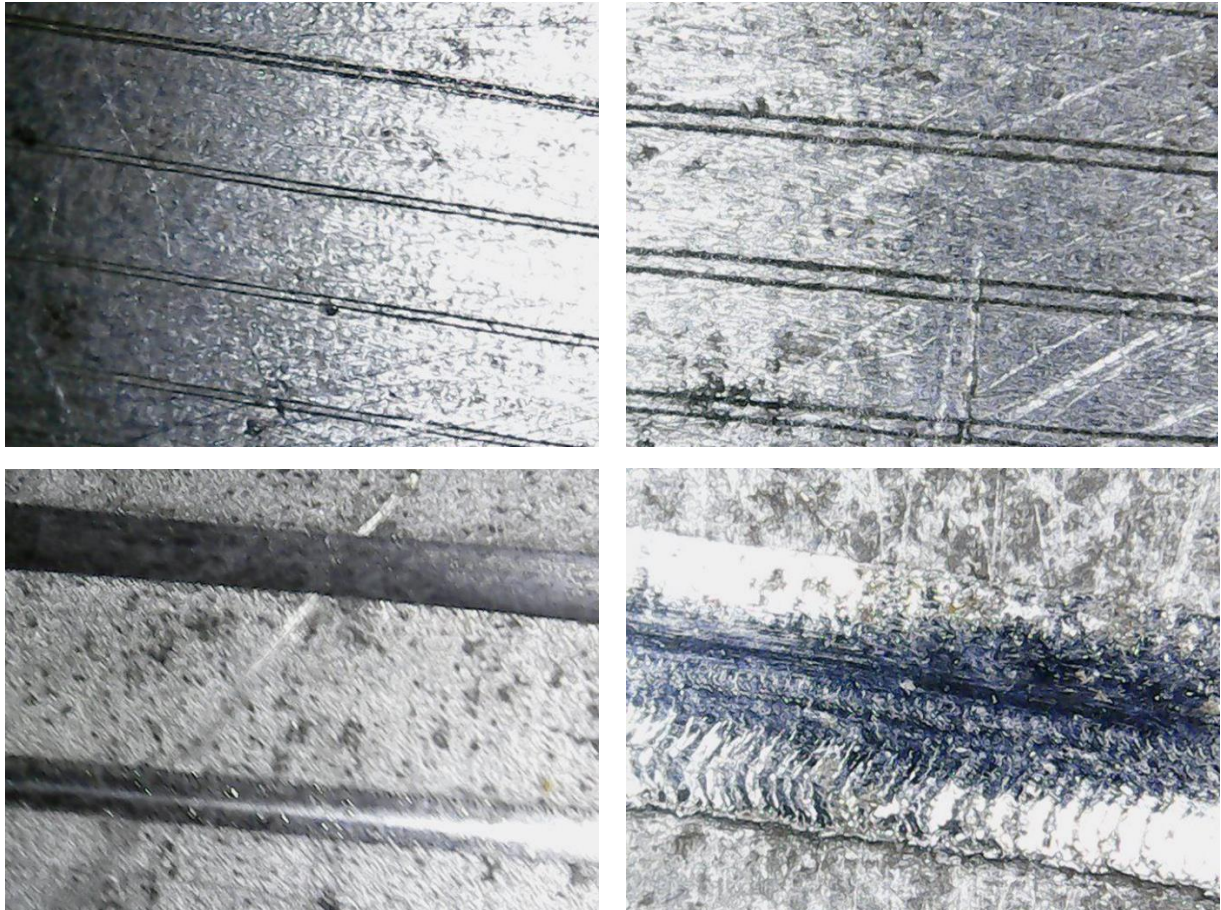


Рис. 4.4.2. Мікрофотографії (з наростальним збільшенням) поверхні фальцювальних планок після механічного зміцнення сферичним твердосплавним індентором

Після перевищення локальної межі плинності в зоні контакту відбувається інтенсивне пластичне зміщення кристалічних решіток у напрямку дії тиску. Пластична деформація розповсюджується від поверхні вглиб матеріалу, формуючи характерну деформовану зону півсферичної форми.

У цій зоні активно розвиваються дислокації, а також виникає зернограничне ковзання, рекристалізація та субструктурна перебудова. У сталі 05кп це проявляється переважно у формі ковзання та подовження зерен, тоді як у сталі 08Х18Н10Б – утворенням складних дислокаційних структур і локальних зон наклепу, що забезпечують потенціал для подальшого зміцнення [141].

Важливо, що інтенсивність пластичної деформації залежить не лише від величини тиску, а й від кінематичних параметрів вдавлювання (швидкості переміщення, часу дії навантаження) та властивостей конкретного матеріалу.

У результаті нерівномірного пластичного зміщення матеріалу та його часткового пружного відновлення після проходження індентора, у приповерхневих шарах формується система залишкових напружень. Основну роль відіграють стискаючі залишкові напруження, які утворюються внаслідок витіснення об'єму металу та його фіксації в ущільненому стані. Ці стискаючі напруження є суттєво важливими, оскільки вони:

- зменшують ймовірність розвитку мікротріщин;
- підвищують втомну міцність;
- покращують опір контактному зносу;
- стабілізують форму сформованого мікрорельєфу при подальших циклах навантаження [141].

У сталі 08Х18Н10Б завдяки високій термічній стабільності мікроструктури ці напруження краще зберігаються навіть за підвищених температур, що робить матеріал більш придатним для тривалої експлуатації в складних умовах [141].

У процесі інтенсивної пластичної деформації в кристалічній решітці металу активно генеруються дислокації – лінійні дефекти у механізмі зміцнення. Із зростанням ступеня деформації дислокації накопичуються, взаємодіють між собою, блокуються та формують стійкі конфігурації, що перешкоджають подальшому ковзанню атомних площин. Це призводить до

локального підвищення твердості й опору пластичному переміщенню – класичний механізм дислокаційного зміцнення [141].

У сталі 05кп, яка має більш "м'яку" феритну структуру, дислокаційне зміцнення проявляється менш інтенсивно, але все ж дає відчутний приріст мікротвердості в зоні вдавлювання. Натомість у сталі 08X18H10Б завдяки наявності карбідів титану (TiC), які слугують ефективними бар'єрами для дислокацій, формуються зони з високим ступенем зміцнення та стійкою субструктурною стабілізацією, що значно підвищує ресурс зміцненої поверхні [141].

Внаслідок локального вдавлювання відбувається глибоке мікроструктурне перетворення приповерхневого шару, яке включає:

- подрібнення зерен за рахунок рекристалізації та утворення субзернових меж;
- формування деформаційних текстур – орієнтованого розташування кристалографічних площин, що поліпшує напрямну міцність;
- появу дефектів типу мікротвінів (мікроподвійників) у сталі 08X18H10Б при високому рівні навантаження;
- локальне зміщення фазової рівноваги, особливо у сталях з легуючими елементами [141].

Ці зміни створюють зміцнений приповерхневий шар, що характеризується:

- підвищеною мікротвердістю (у 1.5–2 рази вищою за базовий матеріал);
- зниженою пластичністю (що компенсується загальною міцністю);
- кращою стабільністю геометрії мікрорельєфу під час тертя й циклічного навантаження.

У випадку 08X18H10Б мікроструктура залишається термостійкою, що сприяє її застосуванню в умовах циклічних механічних впливів [141].

4.4.2. Аналітичне моделювання контактної взаємодії індентора з пластинами

Для сферичного індентора, що вдавлюється в ізотропну сталеву пластину (сталь 08X18H10Б, сталь 05кп) з силою F , глибина проникнення h пов'язана з радіусом $R=D/2$, та площею контакту a , згідно з класичною теорією Герца [12]:

$$a = \sqrt{Rh} \quad (4.4.1)$$

Сила вдавлювання через жорсткість контакту:

$$F = \frac{4}{3} E^* \sqrt{Rh^{3/2}} \quad (4.4.2)$$

де: E^* – приведений модуль пружності:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (4.4.3)$$

E_1, ν_1 – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона для індентора (АКТМ+),

E_2, ν_2 – для сталі 08X18H10Б (або 05кп).

Використання приведенного модуля пружності E^* дає змогу звести контакт двох тіл із різними механічними властивостями до еквівалентної моделі взаємодії умовного однорідного тіла з узагальненим модулем пружності [141].

Такий підхід забезпечує спрощення розрахункових процедур, дозволяючи застосовувати універсальні аналітичні співвідношення, зокрема рівняння контактної взаємодії згідно з теорією Герца. Крім того, це дає змогу отримати наближену, але фізично обґрунтовану оцінку жорсткісної реакції системи в зоні контакту.

Пластина ковзає по нерухомому індентору. У цьому випадку розглянуто розподіл напружень у напрямку руху x на поверхні контакту [141].

Контактний тиск:

$$p(x) = p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}, \quad |x| \leq a \quad (4.4.4)$$

де p_0 – максимальний контактний тиск; a – півдовжина області контакту.

Розглянемо невеликий елемент шляху ковзання dx , тоді зміна пластичної деформації:

$$d\varepsilon_p = \frac{\tau(x)}{\sigma_y} dx \quad (4.4.5)$$

де $\tau(x)$ – дотичне напруження на межі ковзання; σ_y – границя плинності сталі [141].

Це дозволяє моделювати накопичення пластичної деформації вздовж напрямку руху та оцінити профіль рельєфу після проходження індентора [141].

Остаточний диференціальний вираз для зміни глибини мікрорельєфу вздовж напрямку ковзання, який описує зміну глибини утвореного рельєфу уздовж напрямку руху індентора;:

$$\frac{dz(x)}{dx} = \phi \cdot \frac{p(x)}{\sigma_y} \quad (4.4.6)$$

де $p(x)$ – нормальний тиск (контактний), що діє на пластину; ϕ – емпіричний коефіцієнт формування рельєфу, залежить від жорсткості пластини та властивостей АКТМ+; $z(x)$ – профіль заглиблення рельєфу [141].

Ця формула описує геометричний профіль мікрорельєфу, що формується внаслідок дії контактного тиску. При переміщенні пластини вздовж півкруглого індентора з постійним зусиллям вдавлювання, профіль мікрорельєфу та ступінь зміцнення залежать від швидкості ковзання [141].

Залежність описується таким чином [141]:

– Час контакту матеріалу з індентором:

$$t_c = \frac{2R}{v} \quad (4.4.7)$$

де: t_c – час локального контакту; R – радіус півкруглого індентора; v – швидкість переміщення пластини.

– Енергія пластичної деформації в одиниці об'єму:

$$w_p = \sigma_y \cdot \varepsilon_p(t_c) \quad (4.4.8)$$

де: ε_p – пластична деформація, яка залежить від часу контакту.

– Залежність глибини рельєфу від швидкості:

$$h_v = h_0 \cdot \exp(-k \cdot v) \quad (4.4.9)$$

де: h_0 – максимальна глибина при повільному переміщенні ($v \rightarrow 0$),

k – емпіричний коефіцієнт, що враховує чутливість матеріалу до швидкості деформації [141].

Залежно від властивостей сталі, характер впливу швидкості переміщення на глибину рельєфу суттєво відрізняється: для 05кп із високою пластичністю $k_v^{05кп} < k_v^{08X18H10Б} \rightarrow$ зменшення глибини відбувається повільніше, що свідчить про її здатність зберігати форму рельєфу навіть при підвищених швидкостях деформації [141].

Натомість для 08X18H10Б із вищою твердістю спостерігається не лише більш інтенсивне зменшення глибини при зростанні швидкості v , але й помітне зниження інтенсивності деформаційно-індукованих фазових перетворень, що обмежує ступінь локального зміцнення в умовах швидкісного контакту [141].

У цьому контексті дотичні напруження, які виникають на межі контакту, спричиняють локальну пластичну деформацію матеріалу, яка, накопичуючись уздовж траєкторії ковзання індентора, призводить до утворення заглиблення.

Це заглиблення, у свою чергу, описується як зміна глибини рельєфу вздовж координати переміщення [141].

Процес внутрішньої деформації матеріалу пластини під дією контактної навантаження описано у формулі 5, тоді як формула 6 подає геометричну модель зовнішнього рельєфу поверхні, сформованого внаслідок цієї деформації. Обидва математичні вирази є складовими єдиної фізичної моделі контактної взаємодії, де існує прямий зв'язок між полем напружень і геометричними параметрами сформованого рельєфу (рис. 4.4.3) [141].

З огляду на викладене, узагальнюючи фізичну інтерпретацію формул 1 і 2, розглянуто їх практичне застосування. З метою кількісної оцінки впливу механічних властивостей матеріалу на параметри контактної деформації було

здійснено аналітичне моделювання на основі узагальнених фізико-механічних залежностей [141].

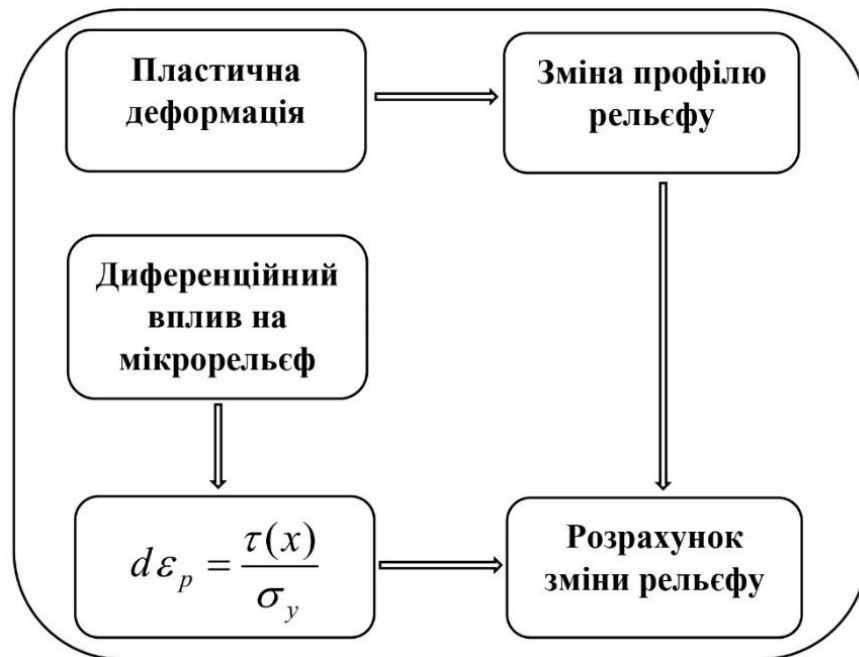


Рис. 4.4.3. Візуалізація залежності між пластичною деформацією та формуванням профілю мікрорельєфу

З урахуванням формул (1)–(4) проведено кількісне моделювання параметрів контактної взаємодії для конкретних матеріалів. Зокрема, із використанням заданих механічних характеристик сталей 08X18N10Б та 05кп виконано розрахунки важливих показників, що описують геометрію контактного рельєфу, зокрема півширини зони контакту, максимального тиску та приведенного модуля пружності.

4.4.3. Розрахунок параметрів контакту та 3D-візуалізація мікрорельєфу

Для забезпечення об'єктивності порівняльного аналізу всі розрахунки виконано за єдиних початкових умов. Це дозволяє обґрунтовано оцінити вплив саме фізико-механічних характеристик матеріалу на параметри контактної взаємодії при формуванні мікрорельєфних напрямних на робочій поверхні фальцювальних планок. Нижче наведено вихідні дані, спільні для

обох сталей, а також значення ключових показників, обчислених для кожного випадку окремо [141].

Вхідні дані: (для індентора) [141]

- діаметр індентора: 2,5 мм $\rightarrow$ радіус $R = 1,25$ мм;
- глибина вдавлювання: $h = 0,75$ мм
- модуль Юнга індентора (АКТМ+): $E_1 = 800\,000$ МПа
- коефіцієнт Пуассона індентора: $\nu_1 = 0,10$

1 – (для сталі 08Х18Н10Б) 2 – (для сталі 05кп)

- $E_2 = 190\,000$ МПа – $E_2 = 210\,000$ МПа
- $\nu_2 = 0,30$ – $\nu_2 = 0,29$

Приведений модуль пружності E^*

$$\frac{1}{E_1^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} = \frac{0,99}{800000} + \frac{0,91}{190000} = 1,2375 \times 10^{-6} + 4,789 \times 10^{-6} = 6,0265 \times 10^{-6}$$

$$E_1^* = \frac{1}{6,0265 \times 10^{-6}} \approx 165920,75 \text{ МПа}$$

$$E_2^* \approx 178605,60 \text{ МПа}$$

Півширина плями контакту a

$$a_1 = \sqrt{1,25 \cdot 0,75} = \sqrt{0,9375} \approx 0,9682$$

$$a_2 \approx 0,9682$$

Сила вдавлювання F

$$F_1 = \frac{4}{3} \cdot 165920,75 \cdot \sqrt{1,25} \cdot (0,75)^{3/2} \approx 160652,08 \text{ Н}$$

$$F_2 \approx 172934,13 \text{ Н}$$

Максимальний контактний тиск p_0

$$\rho_{01} = \frac{3 \cdot 160652,08}{2 \cdot \pi \cdot (0,9682)^2} \approx 81819,43 \text{ МПа}$$

$$\rho_{02} \approx 88074,63 \text{ МПа}$$

Узагальнені наступні результати, разом з представленими в розрахунках, наведено в таблиці 3, що дозволяє здійснити порівняльний аналіз впливу властивостей матеріалу на формування мікрорельєфу, зокрема простежити

залежність геометричних параметрів контактної зони від модуля пружності, межі плинності та коефіцієнта Пуассона досліджуваних сталей [141].

Таблиця 4.4.1.

Порівняльний аналіз впливу властивостей матеріалу на формування мікрорельєфу на робочій поверхні фальцювальних пластин

Матеріал	D індентора (мм)	h (мм)	E* (МПа)	a (мм)	F (Н)	p ₀ (МПа)
08X18H10Б	2.5	0.5	165920.75	0.7906	87447.91	66805.29
05кп	2.5	0.5	178605.6	0.7906	94133.42	71912.63
08X18H10Б	2.5	0.75	165920.75	0.9682	160652.08	81819.43
05кп	2.5	0.75	178605.6	0.9682	172934.13	88074.63
08X18H10Б	2.5	1.0	165920.75	1.118	247340.05	94476.94
05кп	2.5	1.0	178605.6	1.118	266249.51	101699.82
08X18H10Б	3.5	0.5	165920.75	0.9354	103469.77	56460.77
05кп	3.5	0.5	178605.6	0.9354	111380.16	60777.27
08X18H10Б	3.5	0.75	165920.75	1.1456	190086.1	69150.04
05кп	3.5	0.75	178605.6	1.1456	204618.42	74436.65
08X18H10Б	3.5	1.0	165920.75	1.3229	292656.7	79847.59
05кп	3.5	1.0	178605.6	1.3229	315030.67	85952.04

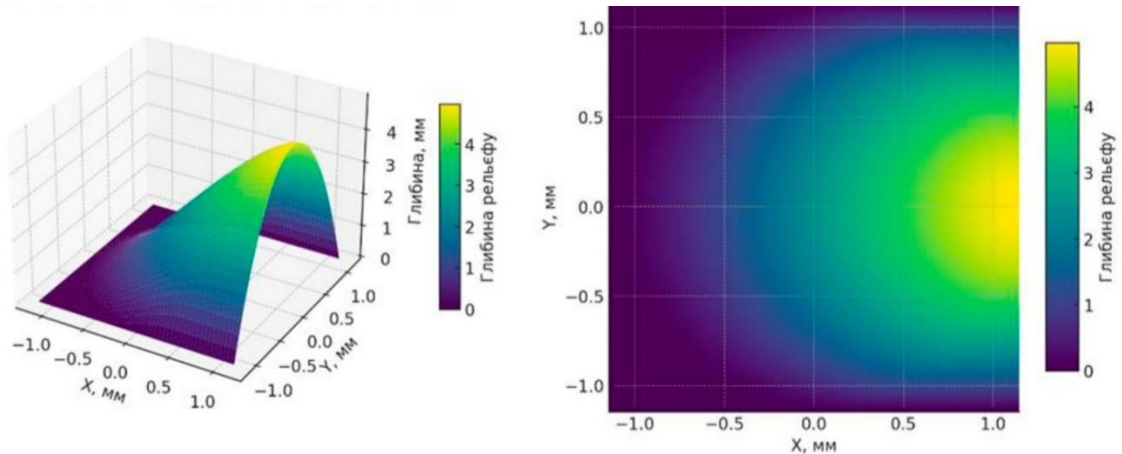
Отримані результати становлять методичну основу для подальшого аналізу особливостей пружного та пластичного деформування контактувальних тіл. Вони також є підґрунтям для уточнення критеріїв раціонального вибору матеріалів у задачах мікроструктурного формоутворення мікрорельєфних напрямних на робочій поверхні профільних фальцювальних планок [141].

Для візуалізації впливу механічних властивостей матеріалу на параметри рельєфоутворення нижче наведено діаграми залежності між максимальним контактним тиском і відповідною глибиною мікрорельєфних напрямних, сформовані за допомогою програми MATLAB (рис. 4.4.4). Такий підхід дозволяє простежити характер змін геометрії заглиблення залежно від опору

матеріалу пластичній деформації, що є важливим для подальшої інженерної інтерпретації результатів [141].

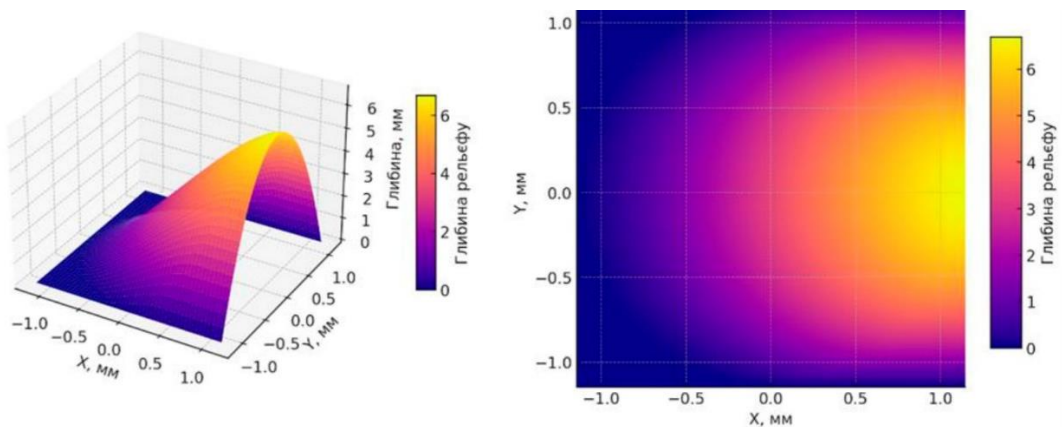
Для ілюстрації особливостей формування мікрорельєфу в зоні контакту індентора зі сталевими пластинами використано два типи графічного подання: 3D-модель та 2D-теплокарту, кожен з яких доповнено кольоровою шкалою глибини деформації (рис. 4.4.4) [141].

На 3D-моделях (ліворуч) представлено тривимірне зображення рельєфу, утвореного внаслідок вдавлювання сферичного індентора. Кольорова шкала, що супроводжує обидві 3D-моделі, використовується для умовного кодування глибини рельєфу: темні кольори (синій, фіолетовий, червоний) відповідають максимальній глибині, а світлі відтінки (жовтий, рожевий, світло-зелений) вказують на вищі ділянки поверхні [141].



a

б



в

г

Рис. 4.4.4. Тривимірні моделі мікрорельєфу на пластинах з корозійностійкої сталі 08X18H10Б й вуглецевої сталі 05кп та 2D-теплокарти глибини рельєфу:

a – 3D мікрорельєф ($\varnothing 3,5$ мм, сталь 08X18H10Б, $h=0,75$ мм); *б* – 2D-теплокарта глибини рельєфу (сталь 08X18H10Б); *в* – 3D мікрорельєф ($\varnothing 3,5$ мм, сталь 05кп, $h=0,75$ мм); *г* – 2D-теплокарта глибини рельєфу (сталь 05кп)

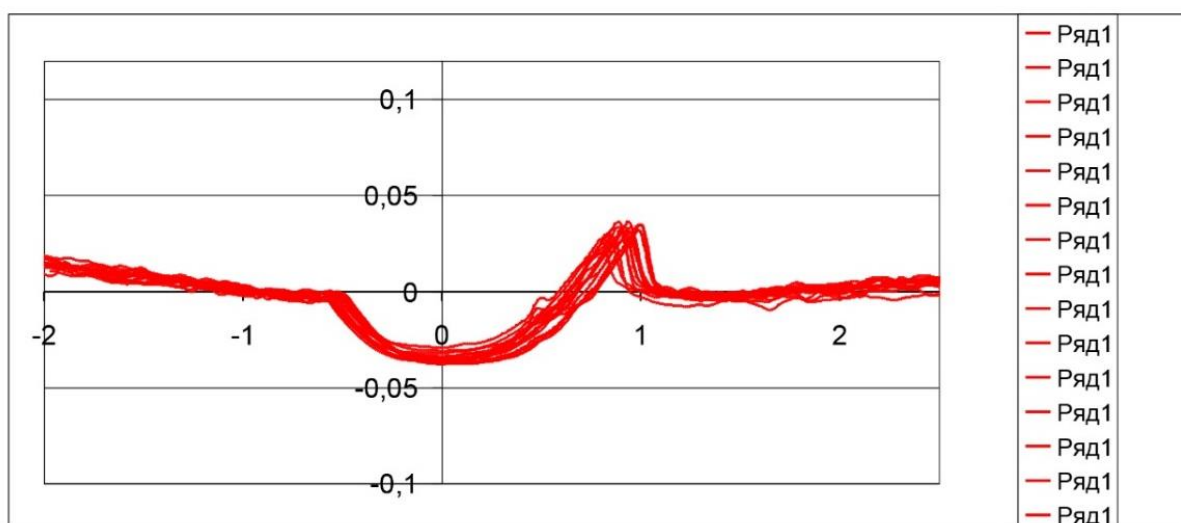
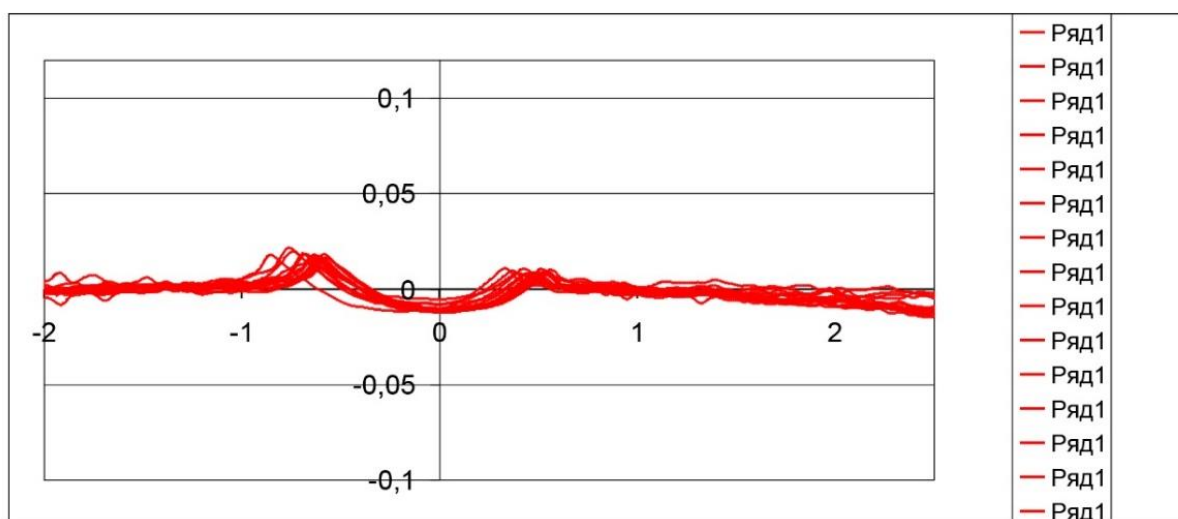
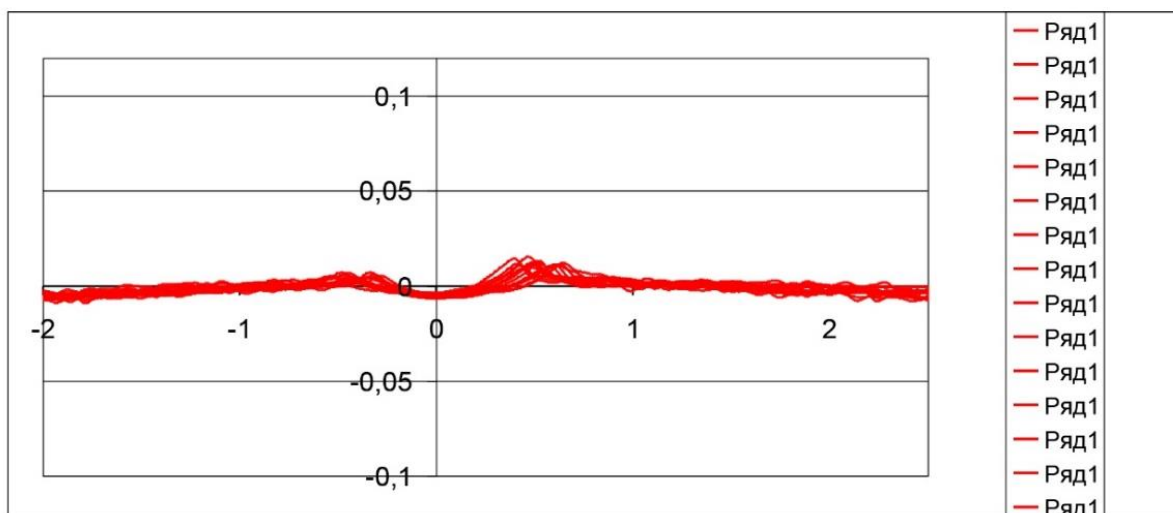
Для деталізованого аналізу топографії рельєфу подано також 2D-теплокарти (праворуч). Ці карти відображають той самий розподіл глибини, але у вигляді плоскої колірної мапи, де кожна точка площини зафарбована відповідно до своєї глибини. Таке представлення сприяє вивченню радіальної симетрії, площі контактної плями та локалізації зон максимального впливу [141].

Візуалізаційні результати у вигляді тривимірних рельєфних моделей та відповідних теплокарт, отримані після вдавлювання сферичних інденторів, забезпечують якісне уявлення про характер пластичної деформації матеріалу у зоні локального навантаження. Вони дають змогу не лише оцінити геометрію контактного сліду, але й простежити відмінності у поведінці сталей різного типу під однаковими навантажувальними умовами [141].

4.4.4. Експериментальні дослідження профілограм та параметрів шорсткості

Для оцінки характеру сформованого мікрорельєфу та уточнення геометричних особливостей деформації матеріалу в зоні контакту було виконано детальне трасування профілю поверхні у вигляді поперечних профілограм (рис. 4.4.5–4.4.6) [140]. Вимірювання здійснювалися вздовж лінії дії індентора на ділянках робочої поверхні після локального пластичного деформування (15 вимірювань вздовж кожної лінії) [141].

Проведене профілометричне дослідження дозволило простежити характер змін висоти поверхні пластин зі сталей 05кп та 08X18H10Б після локалізованого впливу твердосплавного сферичного індентора. Усі досліджені зразки виявили типову картину пластичної деформації з утворенням глибокої центральної западини та вираженого периферійного піка [141].



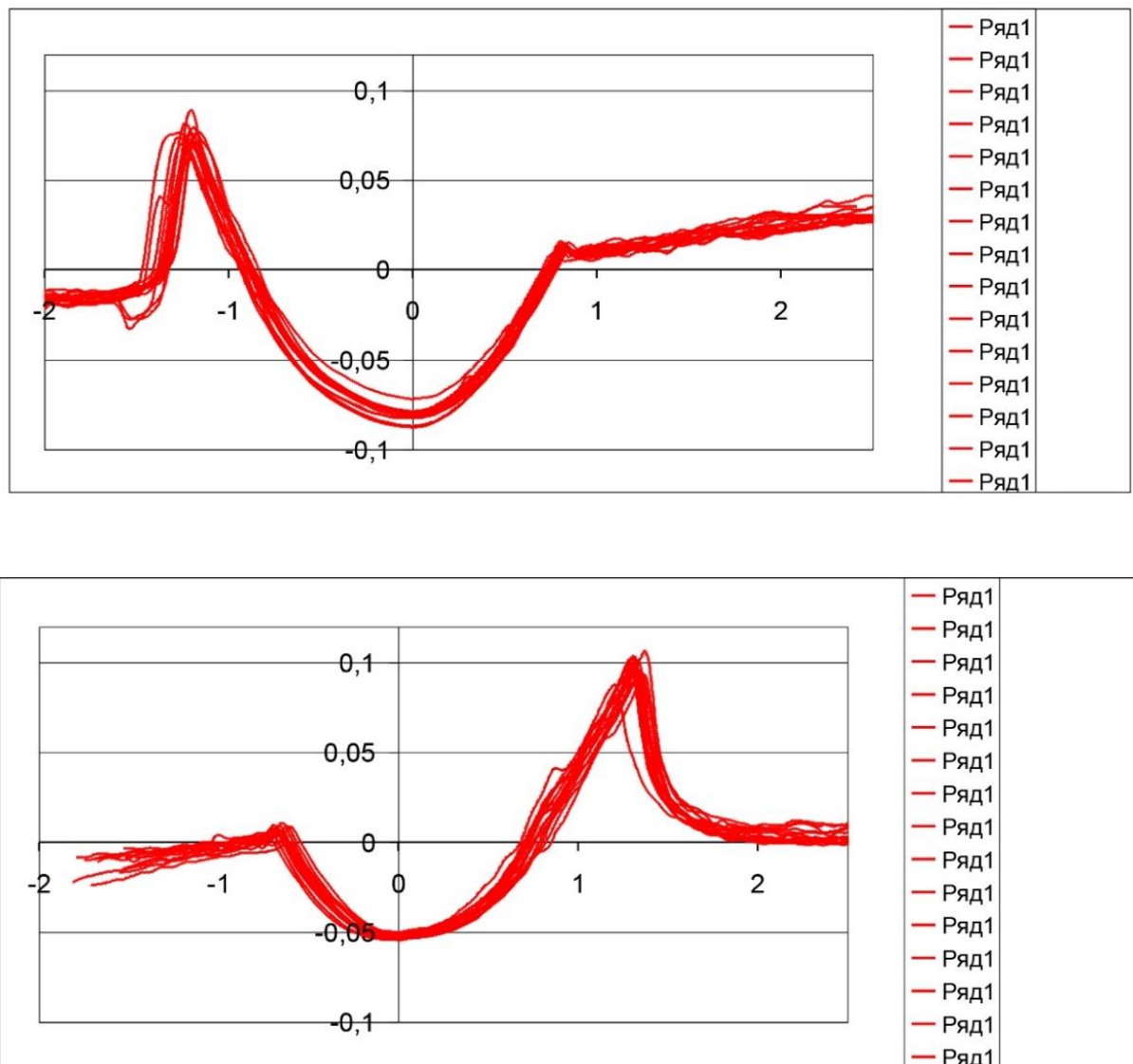
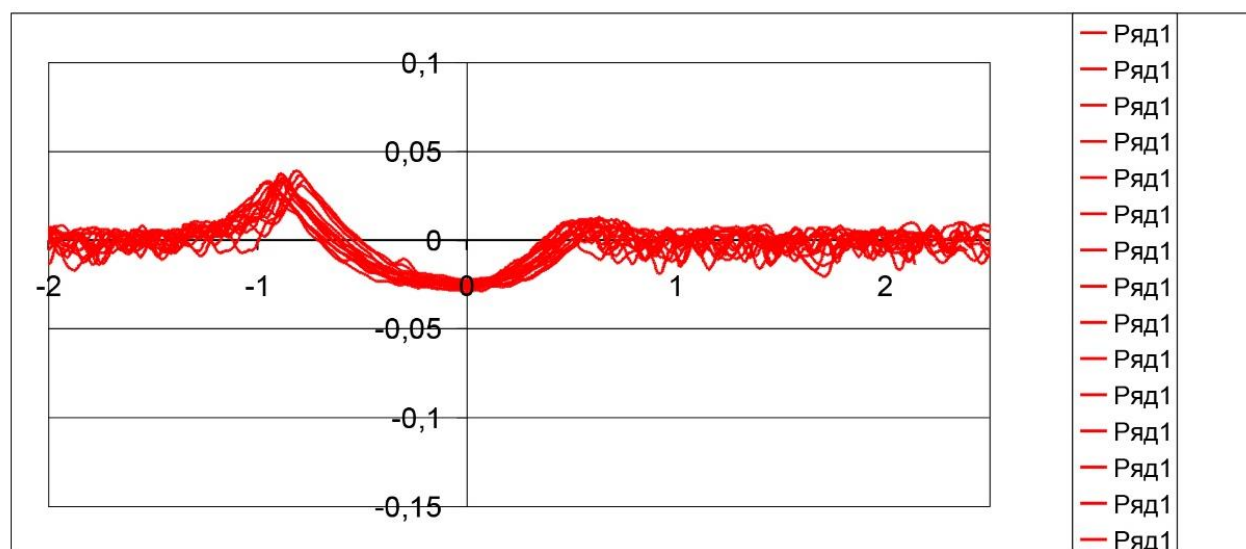
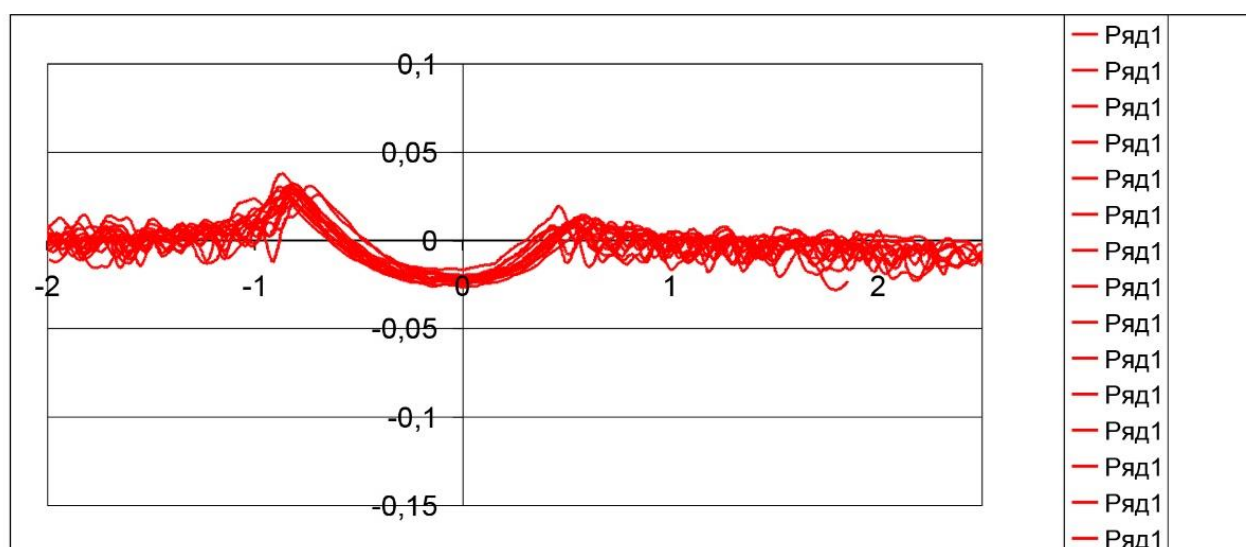
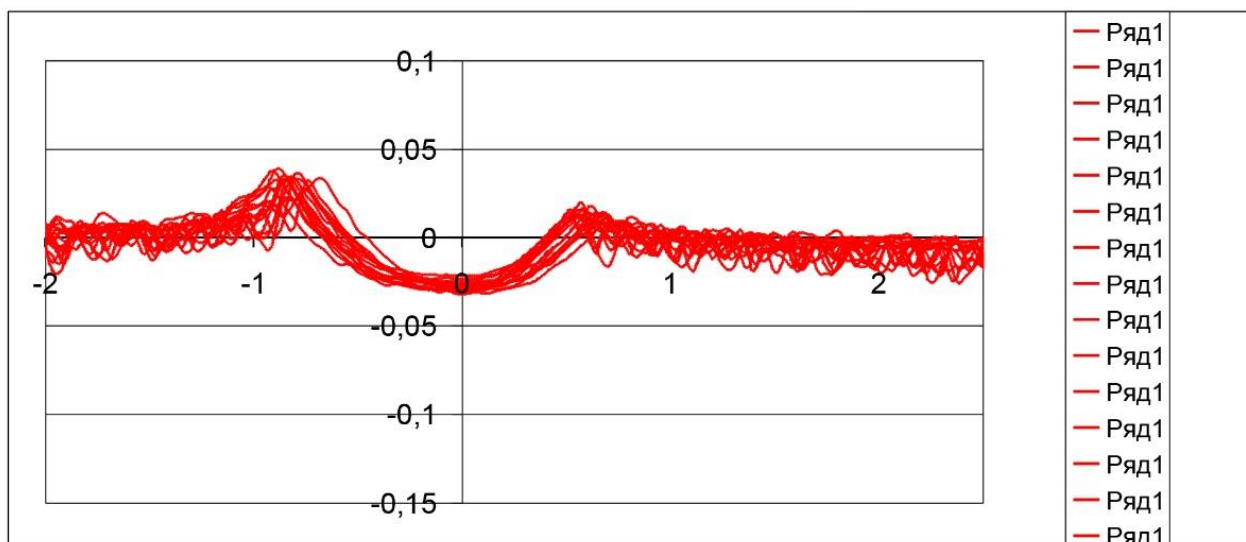


Рис. 4.4.5. Профілограми мікрорельєфу поверхневої шорсткості пластини зі сталі 05кп після зміцнення сферичним індентором

Встановлено, що для зразків зі сталі 05кп характерним є утворення більш широкої зони деформації з плавним переходом від мінімального до максимального значення висоти профілю. Це свідчить про високу пластичність вуглецевої сталі та її схильність до більш глибокого видавлювання матеріалу при контакті з індентором [141].

У випадку сталі 08Х18Н10Б зафіксовано вузький і локалізованіший профіль з менш вираженими екстремальними значеннями, що вказує на вищу твердість та опір пластичній деформації. Геометрія мікрорельєфу після зміцнення є більш стабільною та симетричною [141].



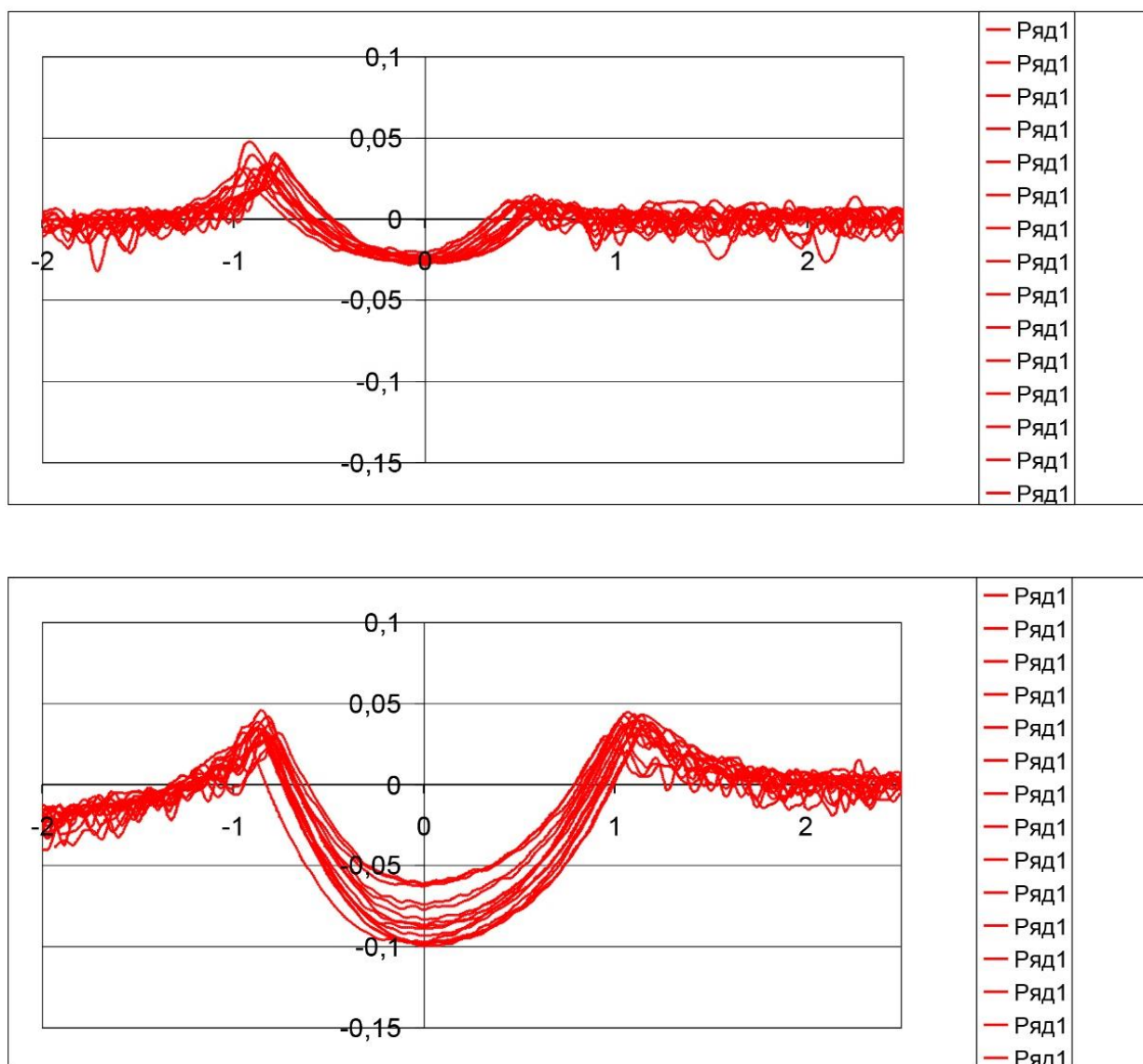


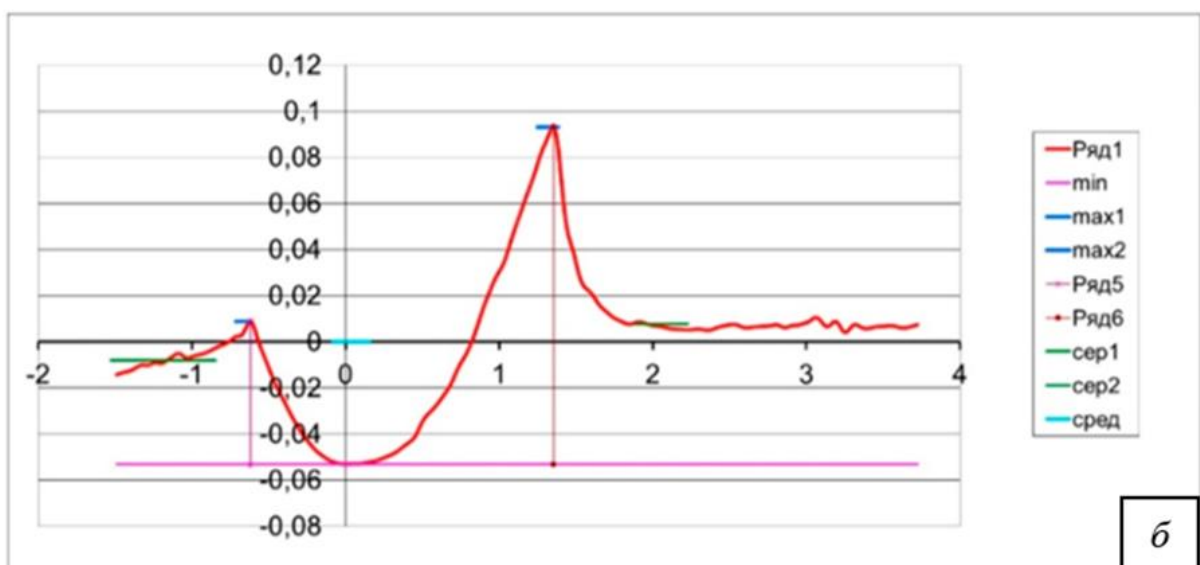
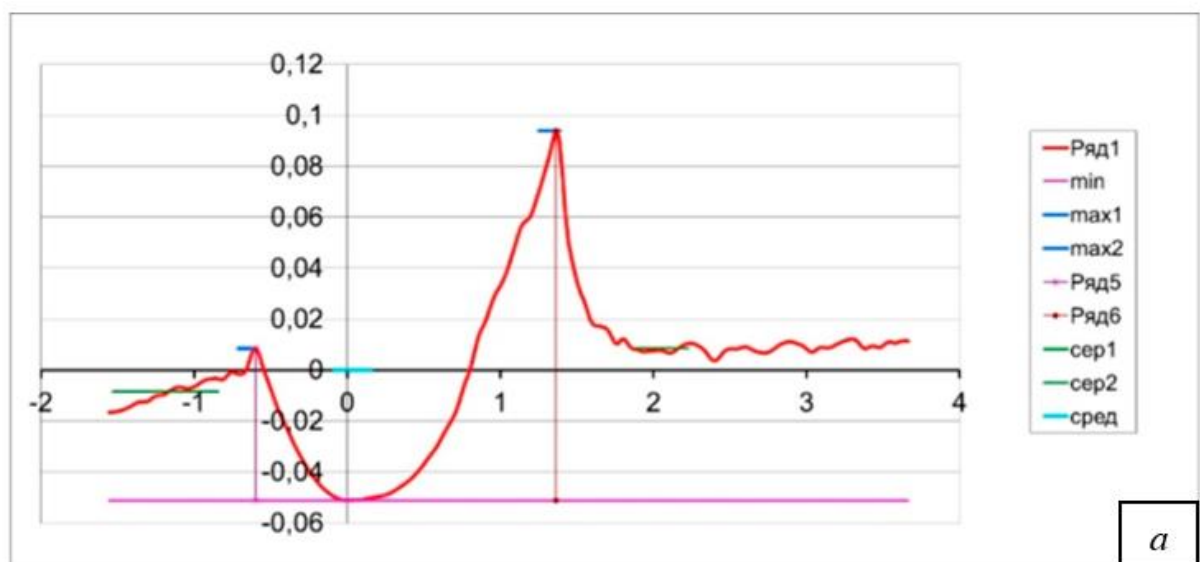
Рис. 4.4.6. Профілограми мікрорельєфу поверхневої шорсткості пластини зі сталі 08X18H10Б після зміцнення сферичним індентором [141]

Різниця у поведінці мікрорельєфу між двома матеріалами підтверджує доцільність використання сталі 08X18H10Б для елементів, де пріоритетною є стабільність і відтворюваність направляючої поверхні профільних фальцювальних планок. Однак для повноцінного порівняння ефективності зміцнення профільних фальцювальних планок, зокрема з точки зору зміни мікрогеометрії робочої поверхні, необхідне залучення кількісних показників шорсткості [141].

З цією метою проведено серію лабораторних вимірювань поверхневої шорсткості після зміцнення зразків, виготовлених із сталі 05кп та 08X18H10Б.

Параметри шорсткості визначалися за трьома основними критеріями: середньою арифметичною висотою профілю (R_a), висотою нерівностей за десятьма точками (R_z) та максимальною висотою профілю (R_{max}) [141].

Для ілюстрації методики оброблення експериментальних даних і виконання розрахунків параметрів шорсткості з отриманої сукупності вимірювань (рис. 4.4.5) було відібрано характерні профілограми. Наведені нижче профілограми є репрезентативними прикладами з серії експериментальних вимірювань і використані для демонстрації порядку визначення параметрів R_a , R_z та R_{max} [141].



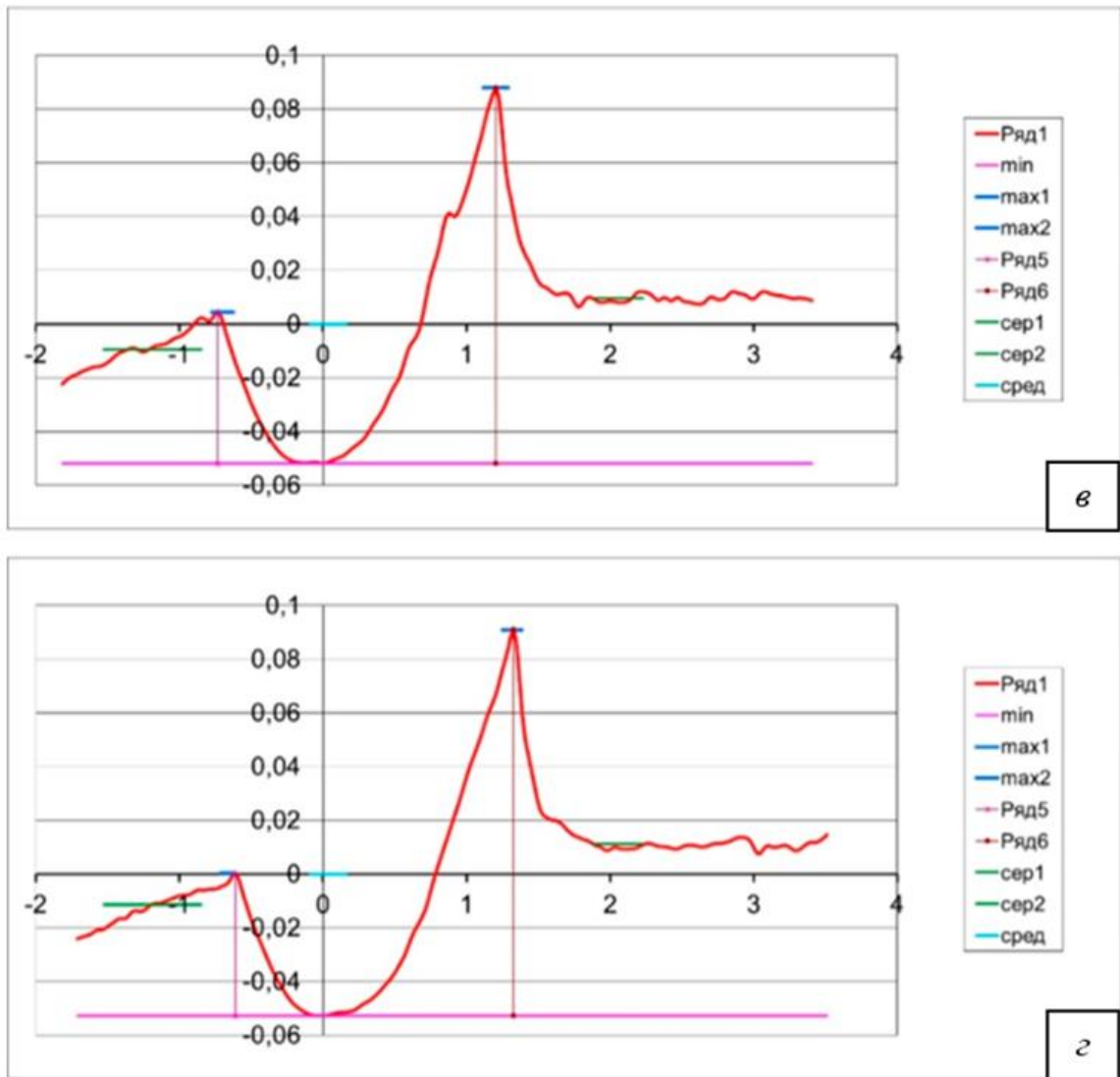


Рис. 4.4.7. Профілограми мікрорельєфу поверхневої шорсткості пластини із сталі 05кп після зміцнення сферичним індентором: *а* – характерна профілограма з виділенням середньої лінії профілю; *б* – профілограма з позначенням максимальних відхилень, використаних для визначення параметра $R_{\max}$; *в* – профілограма з визначенням висоти нерівностей за десятьма точками R_z ; *з* – профілограма, використана для розрахунку середньої арифметичної висоти профілю R_a [141]

Наведені позначення у правій частині профілограми (легенда) відображають алгоритм оброблення профілограми та графічне визначення основних параметрів шорсткості відповідно до прийнятої методики розрахунків [141]:

- Ряд1 – експериментально виміряний профіль поверхні (реальна профілограма).
- min – мінімальне значення відхилення профілю від середньої лінії (найглибша западина).
- max1, max2 – максимальні значення відхилень профілю (найвищі піки), що використовуються для визначення параметра ($R_{\max}$).
- Ряд5, Ряд6 – допоміжні побудови, що відповідають крайнім ординатам профілю (рівні мінімуму та максимуму).
- ser1, ser2 – локальні середні лінії на окремих ділянках профілю.
- сред – середня (базова) лінія профілю, відносно якої визначаються параметри шорсткості R_a , R_z та $R_{\max}$.

Для кожного зразка виконувалося три незалежні вимірювання, на основі яких обчислено усереднені значення відповідних параметрів. Узагальнені результати експериментальних вимірювань подано у таблиці 4.4.2 для зразків з вуглецевої сталі 05кп та у таблиці 4.4.3 для зразків з корозійностійкої сталі 08X18H10Б [141].

Таблиця 4.4.2.

Результати експериментальних вимірювань
для зразків з вуглецевої сталі 05кп

	Ст_1	Ст_2	Ст_3	Ст_4	Ст_5
R_a	0,502	0,160	0,187	0,249	0,273
	0,293	0,154	0,316	0,318	0,541
	0,311	0,249	0,279	0,486	0,320
R_a ср	0,369	0,188	0,261	0,351	0,378
R_z	2,950	0,960	0,950	1,970	1,410
	1,470	0,940	1,510	1,900	3,580
	1,700	1,680	1,380	2,810	1,800
R_z ср	2,040	1,193	1,280	2,227	2,263
$R_{\max}$	2,700	1,910	2,130	2,290	4,220
	1,690	1,070	2,190	4,390	7,400
	2,470	4,850	2,260	4,140	3,920
$R_{\max}$ ср	2,287	2,610	2,193	3,607	5,180

Таблиця 4.4.3.

Результати експериментальних вимірювань
для зразків з корозійностійкої сталі 08X18H10B

	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7	H_8
Ra	0,115	0,297	0,111	0,091	0,115	0,142	0,106	0,115
	0,100	0,121	0,131	0,104	0,098	0,139	0,130	0,099
	0,143	0,104	0,108	0,115	0,159	0,119	0,145	0,094
Ra cp	0,119	0,174	0,117	0,103	0,124	0,133	0,127	0,103
Rz	0,790	1,720	0,730	0,650	0,890	0,740	0,790	0,810
	0,720	1,600	0,940	0,670	0,680	1,040	1,000	0,740
	1,240	0,750	0,790	0,760	1,450	0,940	1,030	0,630
Rz cp	0,917	1,357	0,820	0,693	1,007	0,907	0,940	0,727
Rmax	1,250	2,000	0,990	0,920	1,380	0,920	1,250	1,720
	1,260	2,170	1,250	1,020	0,800	1,440	1,950	1,860
	1,730	1,820	1,410	1,070	3,380	1,720	1,750	1,570
Rmax cp	1,413	1,997	1,217	1,003	1,853	1,360	1,650	1,717

Зміцнення поверхні твердосплавними інденторами сприяло суттєвому зниженню параметрів шорсткості як для вуглецевої сталі AISI 1005, так і для корозійностійкої сталі 08X18H10B. При цьому сталь 08X18H10B продемонструвала значно нижчі кінцеві значення шорсткості: Ra – 0,12 мкм проти 0,31 мкм (у 2,5 раза менше), Rz – 0,92 мкм проти 1,80 мкм (у 2 рази менше), Rmax – 1,53 мкм проти 3,18 мкм (більш ніж у 2 рази менше) – порівняно з відповідними значеннями для сталі 05кп. Отже, отримані результати свідчать про вищу ефективність процесу зміцнення для сталі 08X18H10B, що забезпечує формування більш гладкого та стабільного мікрорельєфу поверхні [141].

Параметри шорсткості після обробки сталі 08X18H10B характеризуються меншою варіацією між різними зразками (коефіцієнт варіації ~18–22 %) у порівнянні зі сталлю 05кп (~26–40 %). Це означає, що якість сформованого мікрорельєфу на сталі 08X18H10B є більш стабільною. У сталі AISI 1005 спостерігалися окремі випадки аномально високих піків

(Rmax), що погіршують однорідність поверхні. Таким чином, з точки зору повторюваності результатів зміцнення, сталь 08X18H10Б також перевершує сталь 05кп [141].

Більш висока ефективність зміцнення сталі 08X18H10Б пов'язана як з властивостями матеріалу (вищою твердістю, здатністю до рівномірного зміцнення), так і з оптимальним підбором інструменту. Аналіз показав, що індентор більшого діаметра (3,5 мм) доцільніше використовувати для формування мікрорельєфу, оскільки він забезпечує меншу шорсткість і рівномірніший профіль на обох матеріалах. Менший індентор (2,5 мм) призводить до дещо гірших показників шорсткості та більшого розкиду, особливо на м'якшій сталі 05кп [141].

З метою встановлення характеру взаємозв'язків між основними параметрами шорсткості мікрорельєфу поверхні пластин, проведено математичний аналіз експериментальних даних на основі коефіцієнтів парної кореляції Пірсона [143]. Показники були позначені як Ra1–Ra3, Rz1–Rz3 та Rmax1–Rmax3.

Математично коефіцієнт парної кореляції Пірсона для вибірок $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ і $Y=\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ обчислювався за формулою:

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}},$$

де:

- x_i, y_i – індивідуальні значення вибірок X і Y,
- $\bar{x}, \bar{y}$ – середні значення відповідних вибірок,
- n – кількість спостережень у вибірці.

За допомогою програми MATLAB побудовано кореляційну матрицю параметрів шорсткості (рис. 4.4.8) для виявлення наявності лінійних залежностей між окремими парами параметрів [141].

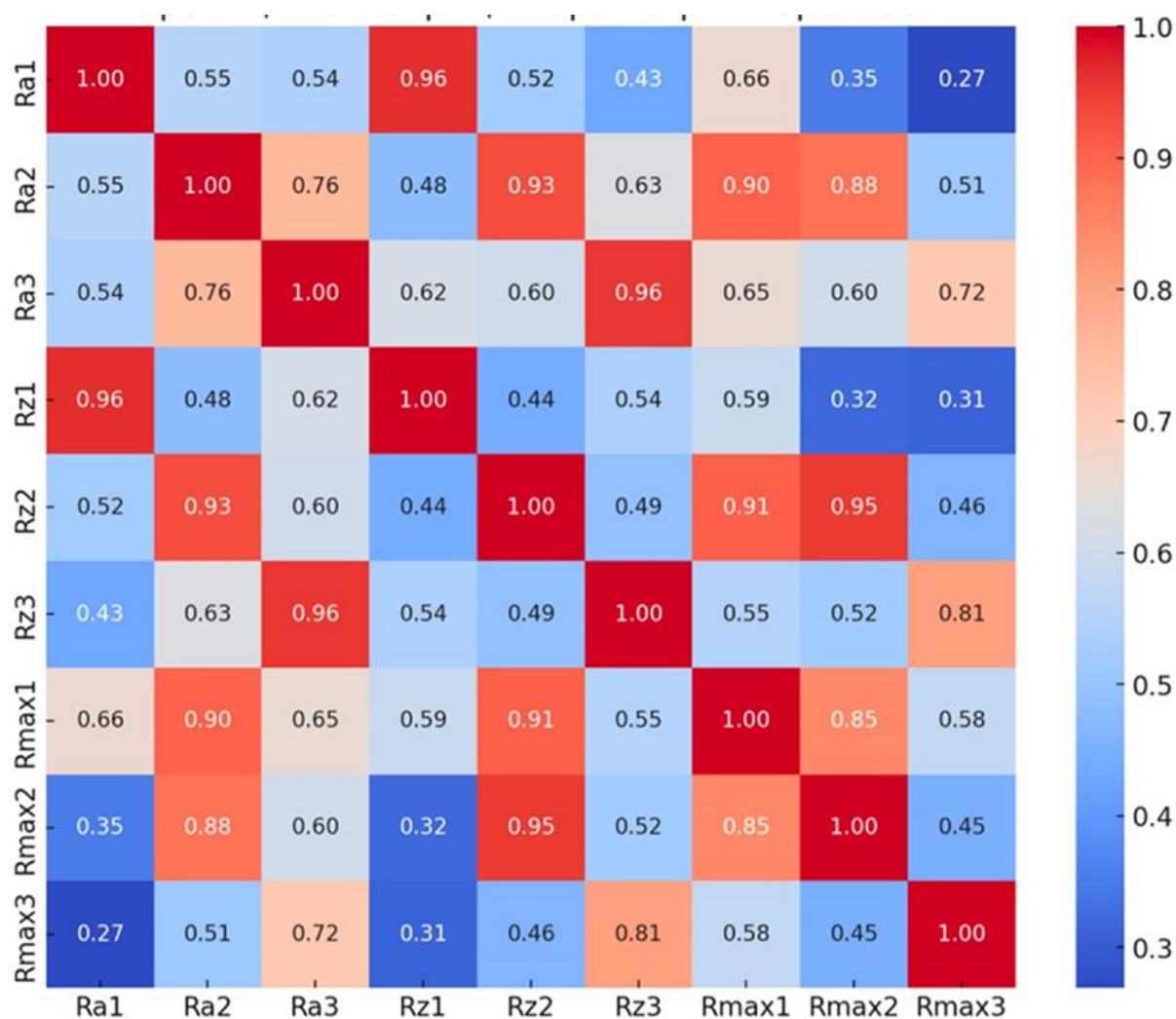


Рис. 4.4.8. Кореляційна матриця параметрів шорсткості

Для наочності сприйняття величин коефіцієнтів кореляції Пірсона між параметрами шорсткості мікрорельєфу було застосовано кольорове кодування комірок кореляційної матриці (табл. 4.4.4) [141].

Кожне значення кореляційного зв'язку між двома змінними візуалізується відповідним кольором, що відповідає його числовому значенню у межах шкали від -1 до $+1$.

Таблиця 4.4.4.

Кольорове кодування комірок кореляційної матриці

Коефіцієнт кореляції (r)	Інтерпретація зв'язку	Кольорове кодування
від +0.90 до +1.00	Високий ступінь прямої кореляції	Насичено червоний

від +0.70 до +0.89	Стійка позитивна кореляція	Світло-червоний / рожевий
від +0.50 до +0.69	Помірна пряма кореляція	Світло-помаранчевий
від +0.30 до +0.49	Позитивна кореляція низької сили	Світло-жовтий

Найбільш виражені позитивні кореляції спостерігаються між величинами R_a та R_z в межах одного вимірювання, зокрема: $R_{a1}-R_{z1} = 0.96$, $R_{a2}-R_{z2} = 0.93$, $R_{a3}-R_{z3} = 0.96$. Це свідчить про стабільність і узгодженість формування загальної шорсткості поверхні та характерної висоти мікронерівностей [141].

Високі значення коефіцієнтів кореляції також виявлено між параметрами R_z та R_{max} , що підтверджує тісний зв'язок між середньою глибиною профілю та найбільшими локальними відхиленнями. Зокрема, для другого вимірювання встановлено кореляцію $R_{z2}-R_{max2} = 0.95$, що вказує на закономірність у профілі шорсткості [141].

Водночас у кореляційній матриці виявлено і слабші взаємозв'язки, наприклад між R_{a1} та R_{max3} (0.27) або R_{z1} та R_{max3} (0.31), що може свідчити про локальну варіативність мікрорельєфу, зумовлену як неоднорідністю структури матеріалу, так і особливостями процесу вдавлювання на різних ділянках [141].

Кореляційні коефіцієнти було впорядковано у симетричну матрицю, що охоплює всі пари R_a , R_z та R_{max} для трьох серій вимірювань. Отримані значення, що перевищують 0.9, свідчать про наявність сильної прямої кореляції та підтверджують стабільність формування мікрорельєфу в процесі зміцнення. Значення нижче 0.4 вказують на ймовірні флуктуації профілю або відмінності в структурі поверхневого шару [141].

Загалом результати кореляційного аналізу підтверджують високу узгодженість між основними параметрами шорсткості у межах окремих зон впливу індентора, що є свідченням стабільності та керованості процесу мікрорельєфного зміцнення.

У контексті практичного використання для профільних планок для фальцювання клапанів інтегральних обкладинок більш доцільним є застосування нержавіючої сталі 08X18H10Б з додатковою обробкою індентором Ø3,5 мм. Це забезпечить мінімальну шорсткість поверхні та стабільний рельєф, що сприятиме кращому зношуванню, герметичності та довговічності вузла. Вуглецева сталь 05кп, незважаючи на її нижчу вартість і здатність легше піддаватися пластичній деформації, після зміцнення характеризується вищими значеннями шорсткості поверхні та менш однорідною структурою мікрорельєфних напрямних [141].

Застосування цього матеріалу доцільне переважно в конструктивно менш навантажених або другорядних елементах, де вимоги до стабільності направляючого профілю є менш суттєвими, ніж у фальцювальних системах інтегральних обкладинок. Загалом, результати проведених досліджень підтверджують функціональні переваги нержавіючої сталі 08X18H10Б у забезпеченні формування високоякісного та стабільного мікрорельєфу направляючих поверхонь профільних фальцювальних планок [141].

4.5. Формування інтегрованої системи технологічного забезпечення якості фальцювання інтегральних обкладинок

У розділах 1–4 дисертаційної роботи виконано комплексний аналіз факторів, що визначають якість фальцювання інтегральних книжково-журнальних обкладинок, розроблено математичні моделі контактної взаємодії, досліджено закономірності формування зміцнювального мікрорельєфу та експериментально встановлено вплив його параметрів на стабільність процесу згину клапанів розгортки обкладинок і зносостійкість профільних фальцювальних планок.

Отримані теоретичні та експериментальні результати дозволили перейти від аналізу окремих параметрів до їх системної інтеграції та сформувати цілісну модель технологічного забезпечення якості фальцювання .

На основі встановлених функціональних залежностей між:

- геометрією мікрорельєфу h_r, s, b_r ;
- фізико-механічними характеристиками поверхневого шару HV, σ_{res} ;
- параметрами контактної взаємодії p_o, μ ;
- показниками зносостійкості W ;
- технологічними режимами фальцювання;

сформовано інтегровану систему забезпечення якості, що відображає причинно-наслідкові зв'язки між етапами проєктування, виготовлення та експлуатації фальцювального вузла (рис. 4.5.1).

Розроблена система технологічного забезпечення якості фальцювання інтегральних обкладинок описується як багатопараметрична функціональна модель, у якій вихідні показники якості є функцією конструктивних, матеріальних та технологічних параметрів процесу.

Нехай:

X_1 – вектор конструктивно-матеріальних параметрів інтегральної обкладинки:

$$X_1 = \{t, E, \alpha, G_f, \Delta_r\} \quad (4.5.1)$$

де t – товщина матеріалу;

E – модуль пружності (жорсткість);

α – напрям волокон / анізотропія;

G_f – геометрія лінії згину (позиція, крок, ширина зони бігу);

Δ_r – допуски на розміри розгортки.

X_2 – вектор параметрів профільних фальцювальних планок:

$$X_2 = \{R, \beta, b_c, H_s, \mu_s\} \quad (4.5.2)$$

де R – радіус кривизни профілю;

β – кут нахилу робочих граней;

b_c – ширина контакту;

H_s – твердість / мікротвердість поверхні;

μ_s – параметри мікрорельєфу (крок, глибина напрямних).



Рис. 4.5.1. Система технологічного забезпечення якості фальцювання інтегральних книжково-журнальних обкладинок

X_3 – вектор режимів фальцювання:

$$X_3 = \{v_f, P_f, k_k, T, W\} \quad (4.5.3)$$

де

v_f – швидкість подачі;

P_f – притискне зусилля;

k_k – коефіцієнт кінематичного контакту (умови ковзання);

T – температура;

W – вологість матеріалу.

X_4 – параметри приклеювання клапанів:

$$X_4 = \{h_g, \tau_p, P_p, A_g\} \quad (4.5.4)$$

де

h_g – товщина клейового шару;

τ_p – час пресування;

P_p – тиск пресування;

A_g – адгезійна міцність з'єднання.

Інтегральний показник якості фальцювання визначається як зважена сума нормованих критеріїв:

$$K_f = \omega_1 \phi_1 + \omega_2 \phi_2 + \omega_3 \phi_3 + \omega_4 \phi_4 + \omega_5 \phi_5 \quad (4.5.5)$$

де

ϕ_1 – точність позиціювання лінії згину;

ϕ_2 – стабільність радіуса згину;

ϕ_3 – відсутність дефектів (тріщин, заломів);

ϕ_4 – симетрія та геометрична стабільність клапанів;

ϕ_5 – повторюваність результату у тиражі;

$$\sum_{i=1}^5 \omega_i = 1 \quad (4.5.6)$$

Комплексний показник якості інтегральної обкладинки враховує не лише якість згину, а й експлуатаційні властивості:

$$K_{ic} = f(K_f, A_g, S_g, Z_f) \quad (4.5.7)$$

де

A_g – міцність клейових з'єднань;

S_g – геометрична стабільність (площинність, відсутність короблення);

Z_f – зносостійкість контактних поверхонь;

довговічність згину (циклічна стійкість).

Стабільність у тиражі описується як функція часу та зношування:

$$K_f(t) = K_{f0} - \Delta K_z(t) \quad (4.5.8)$$

де

ΔK_z – зниження показника якості внаслідок зносу фальцювальних планок та зміни режимів.

Критерієм стабільності є:

$$\sigma_{K_f} \leq \sigma_{dop} \quad (4.5.9)$$

де

σ – середньоквадратичне відхилення показника якості;

σ_{dop} – допустиме значення варіації.

Узагальнюючи результати теоретичних та експериментальних досліджень, встановлено, що комплексний показник якості інтегральної обкладинки K_{ic} визначається сукупністю взаємопов'язаних конструктивно-матеріальних, інструментальних та режимних параметрів процесу фальцювання.

Формалізовано функціональну залежність:

$$K_{ic} = F(X_1, X_2, X_3, X_4) \quad (4.5.10)$$

Отримана узагальнена модель відображає системний характер формування якості фальцювання та дозволяє здійснювати прогнозування

рівня якості інтегральної обкладинки на етапі проектування технологічного процесу.

Висновки до розділу 4

1. У розділі експериментально перевірено та уточнено теоретичні положення і чисельні моделі, розроблені в розділі 3, щодо формування напружено-деформованого стану та зносостійкості профільних фальцювальних планок із зміцнювальним мікрорельєфом.

2. Проведені експериментальні дослідження лазерного формування мікрорельєфу на сталях 05кп і 08Х18Н10Б показали можливість керованого формування поверхневих структур із заданими геометричними параметрами. Встановлено вплив режимів лазерної обробки на глибину мікрорельєфу, стан мікроструктури та рівень мікротвердості приповерхневого шару.

3. Дослідження локального інденторного зміцнення підтвердили ефективність механічного формування мікрорельєфу без значного теплового впливу на матеріал. Такий підхід забезпечує підвищення мікротвердості й формування сприятливого напруженого стану приповерхневих шарів, особливо для сталей з підвищеною пластичністю.

4. Порівняльний аналіз лазерного та інденторного методів формування мікрорельєфу виявив їх технологічні переваги та обмеження. Лазерна обробка забезпечує глибше структурне зміцнення, тоді як інденторне зміцнення характеризується більшою стабільністю геометрії поверхні та мінімальними деформаціями тонких профільних елементів.

5. Встановлено, що нержавіюча сталь 08Х18Н10Б демонструє вищу стабільність сформованого мікрорельєфу та кращі показники мікротвердості порівняно зі сталлю 05кп, що узгоджується з результатами математичного моделювання та підтверджує доцільність її застосування для виготовлення фальцювальних планок із підвищеними експлуатаційними вимогами.

РОЗДІЛ 5

КОНСТРУКТИВНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ФАЛЬЦЮВАННЯ І ПРИКЛЕЮВАННЯ КЛАПАНІВ ІНТЕГРАЛЬНИХ ОБКЛАДИНОК

В розділах 2–4 було досліджено вплив мікрорельєфного зміцнення та режимів навантаження на напружено-деформований стан і зносостійкість профільних фальцювальних планок, а також сформовано критерії забезпечення якості фальцювання інтегральних обкладинок. У розділі 5 ці результати використано для розроблення конструкції нового пристрою для фальцювання та склеювання інтегральних обкладинок з вакуумним транспортуванням розгортки та зміцненими фальцювальними планками, а також для його розрахункового обґрунтування й оцінки перспектив впровадження

5.1. Технічні вимоги до нового фальцювально-склеювального пристрою

За результатами аналізу технологічної схеми виготовлення інтегральних обкладинок (розділ 1) та досліджень зносостійкості профільних планок із мікрорельєфним зміцненням (розділи 2–4) встановлено, що основними обмеженнями існуючих фальцювально-склеювальних ліній є:

- нестабільність утримання розгортки в зоні високих прискорень транспортування;
- чутливість до ковзання та мікрозсувів розгортки відносно фальцювальних планок і клейових зон;
- локальні перенавантаження у зоні фальця, що призводять до зминання картону та відшарувань клапанів.

Тому перед новим фальцювально-склеювальним пристроєм ставилися такі технічні вимоги:

Стійке вакуумне утримання розгортки на всьому шляху проходження через фальцювально-клейовий модуль, із забезпеченням коефіцієнта запасу стійкості $K_{vac} \geq K_{вим}$ для заданого діапазону прискорень стрічки.

Обмеження поздовжнього зміщення розгортки до величини $\Delta x \leq \Delta x_{don}$, що відповідає допускам на суміщення клапанів і клейових зон та жорстким вимогам до геометрії інтегральної обкладинки.

Забезпечення однорідного розподілу контактного тиску у зоні фальцювання за рахунок узгодження профілю зміцнених планок із траєкторією руху клапанів і параметрами вакуумного притиску.

Сумісність із розробленими мікрорельєфними планками зі сталей низьковуглецевої 05кп та корозійностійкої 08Х18Н10Б, у тому числі з урахуванням їх підвищеної зносостійкості та зміненої мікротвердості поверхневого шару.

Адаптивність до різних форматів розгорток, маси та жорсткості матеріалу, без необхідності суттєвої переналадки основних вузлів.

Ці вимоги визначили структуру розробленого пристрою, параметри вакуумної системи та геометрію мікрорельєфних фальцювальних планок.

5.2. Конструкція та принцип роботи розробленого пристрою

Розроблений пристрій для фальцювання і приклеювання клапанів інтегральних обкладинок виконано у вигляді модульного вузла, який інтегрується у фальцювальну-склеювальну лінію після модуля самонакладу розгорток обкладинок і перед модулем каландрування сфальцьованих і склеєних обкладинок (рис. 5.2.1–5.2.4).

У склад пристрою входить транспортувальний механізм, що містить транспортувальну стрічку (1) з множиною отворів (11) діаметром $2d$. Стрічка переміщується по замкнутому контуру, охоплюючи приводний барабан (15) та натяжний барабан (16), і проходить уздовж верхньої площини (13) нерухомої основи (14). Верхня площина (13) нерухомої основи (14) містить множину отворів (12) діаметром d , які співвісно розташовуються з отворами (11) транспортувальної стрічки (1). Через зазначені отвори здійснюється відсмоктування повітря за допомогою вакуумної помпи (17), яка створює вакуум для фіксованого утримання розгортки під час транспортування.

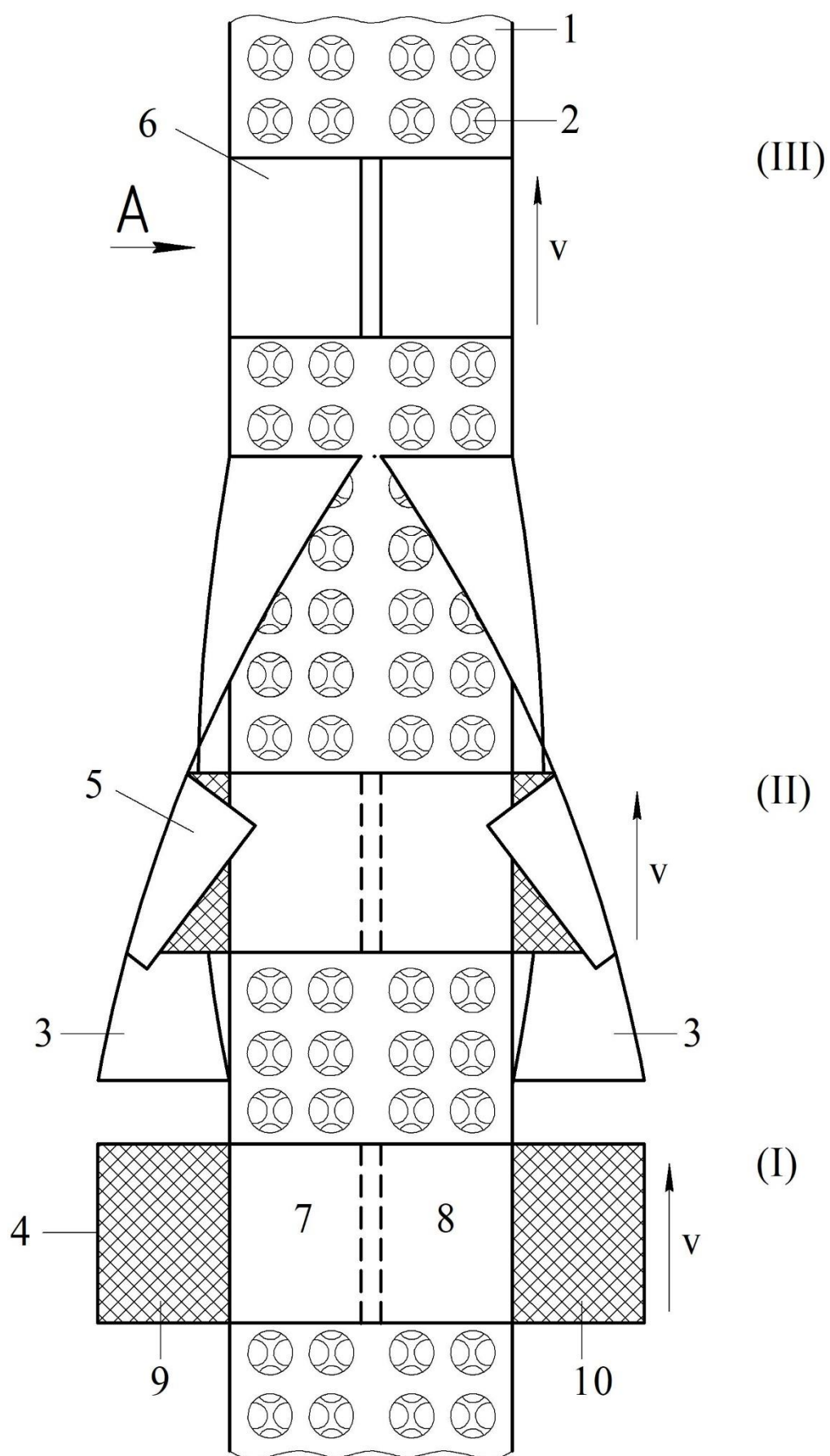


Рис. 5.2.1. Загальна схема фальцювально-транспортного пристрою

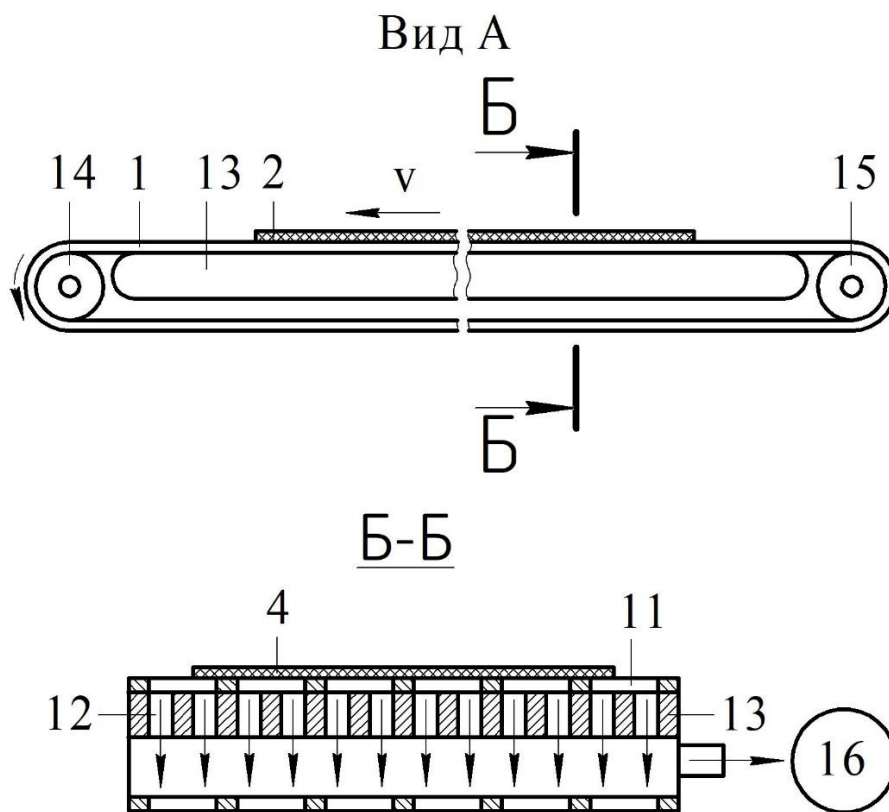


Рис. 5.2.2. Транспортувальна частина пристрою для вакуумного переміщення розгорток інтегральних обкладинок: вид А – загальний вигляд транспортувальної стрічки з розміщенням розгортки та напрямком руху v ; Б-Б – поздовжній переріз вакуумної транспортувальної системи з показом вакуумної камери, перфорованої стрічки та напрямків дії сил притиску.

На верхній гілці транспортувальної стрічки (1) розміщується розгортка (4) інтегральної обкладинки, яка переміщується в напрямку (v) вздовж нерухомої основи (14). Інтегральна обкладинка містить конструктивно визначені зони: передню частину (7), задню частину (8), а також два бокові клапани (9) і (10). Розміри клапанів у площині розгортки співвідносяться з розмірами відповідно передньої та задньої частин, що дозволяє при згинанні утворити двошарову структуру в зоні передньої та задньої частин обкладинки.

Для здійснення згинання клапанів з обох боків від транспортувальної стрічки (1) встановлено профільні фальцювальні елементи (3), виконані у вигляді планок з профілем, сформованим за евольвентною кривою.

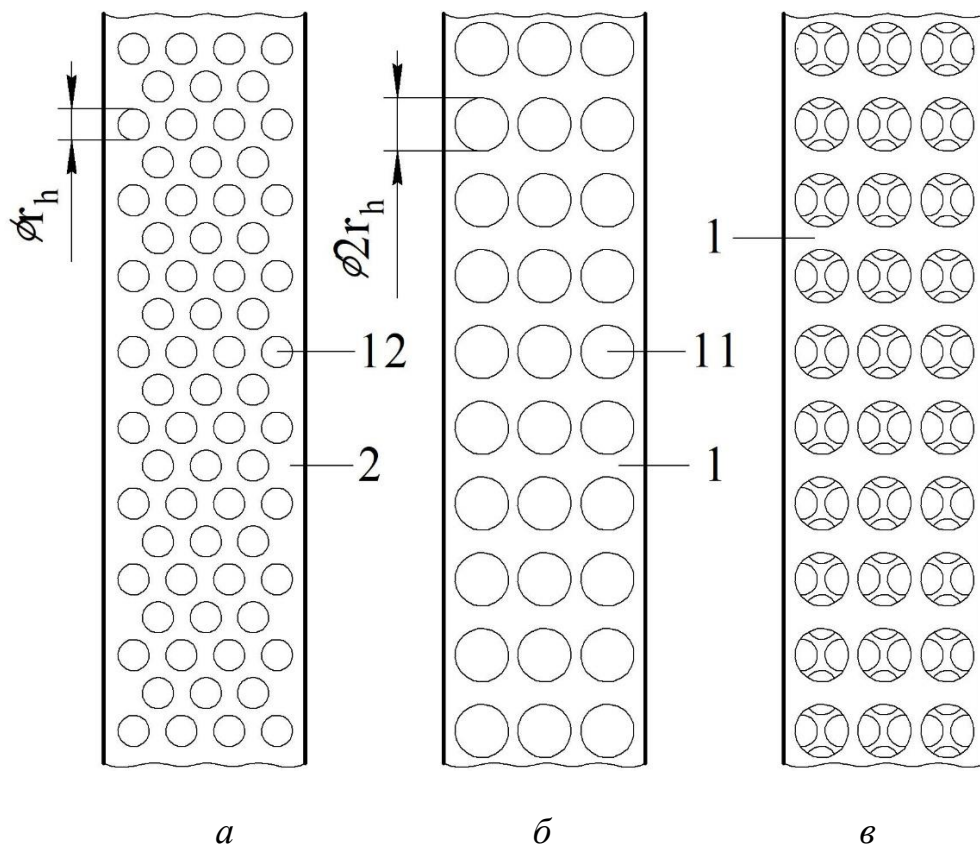


Рис. 5.2.3. Перфоровані фрагменти вакуумної транспортувальної системи: – перфорований фрагмент нерухомої основи; б – перфорований фрагмент транспортувальної стрічки; в – взаємне розташування перфорованих фрагментів транспортувальної стрічки та нерухомої основи під час вакуумного транспортування.

У процесі транспортування профільні фальцювальні планки (3) взаємодіють з клапанами (9) і (10), поступово згинаючи їх від початкового положення розгортки (4), через проміжне положення (5), до завершального положення (6), що відповідає повністю сформованій і склеєній інтегральній обкладинці.

До верхньої частини кожної профільної фальцювальної планки (3) приєднано окремий повітропровід: повітропровід (20) з'єднаний з повітряною камерою лівої фальцювальної планки, а повітропровід (21) – з повітряною камерою правої фальцювальної планки. Подача стисненого повітря здійснюється від пневматичного компресора (22) через відповідні отвори приєднання (19), розташовані у верхній частині кожної планки.

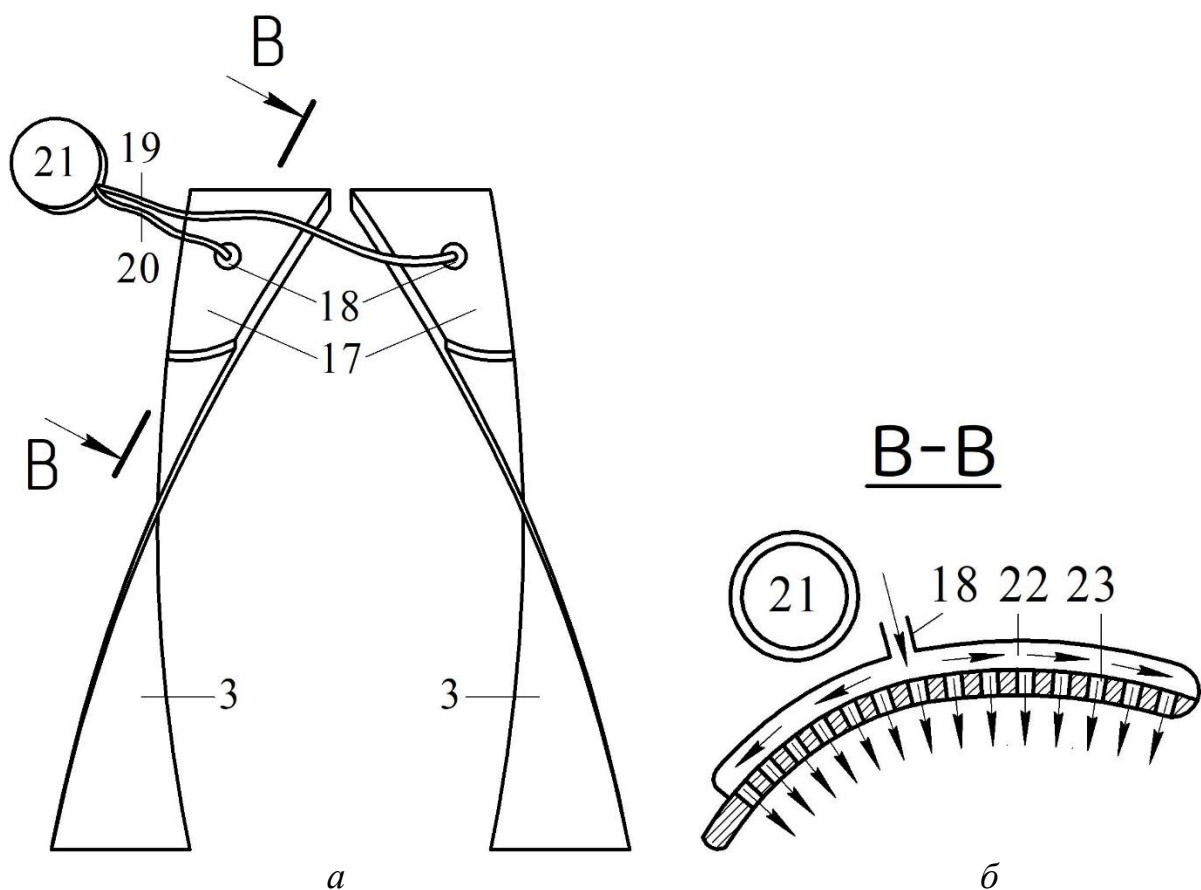


Рис. 5.2.4. Схема розташування фальцювальних планок з механізмом вакуумного притискання клапанів інтегральних обкладинок: *а* – фальцювальний вузол у зборі; *б* – переріз Б–Б із зображенням пневмокамери та розподілу контактних тисків у зоні фальцювання.

Усередині кожної профільної фальцювальної планки (3) з евольвентним профілем розташовано повітряну камеру (23), яка займає лише ту ділянку планки (18), що відповідає зоні завершального етапу фальцювання клапанів обкладинки (9), (10). Камера (23) призначена для дозованої подачі стисненого повітря через канали (24), рівномірно розташовані в області виходу повітря на робочій поверхні евольвентного профілю.

Конструкція пристрою забезпечує високу якість фальцювання та приклеювання клапанів, точну геометрію обкладинки з однорідною товщиною, стабільне вакуумне утримання розгортки під час її

транспортування, а також можливість функціонування пристрою у високошвидкісному автоматизованому режимі.

5.3. Розрахункове обґрунтування параметрів вакуумної системи та транспортувальної підсистеми фальцювально-склеювального модуля

5.3.1. Геометрична та силова модель вакуумного транспортування розгортки інтегральної обкладинки

Для розрахунку вакуумної системи із загальної конструктивної схеми пристрою (рис. 5.2.1–5.2.4) виокремлено механізм транспортування (рис. 5.3.1), який подано окремо з автономною нумерацією елементів, відмінною від нумерації у повному комплекті креслень пристрою [154].

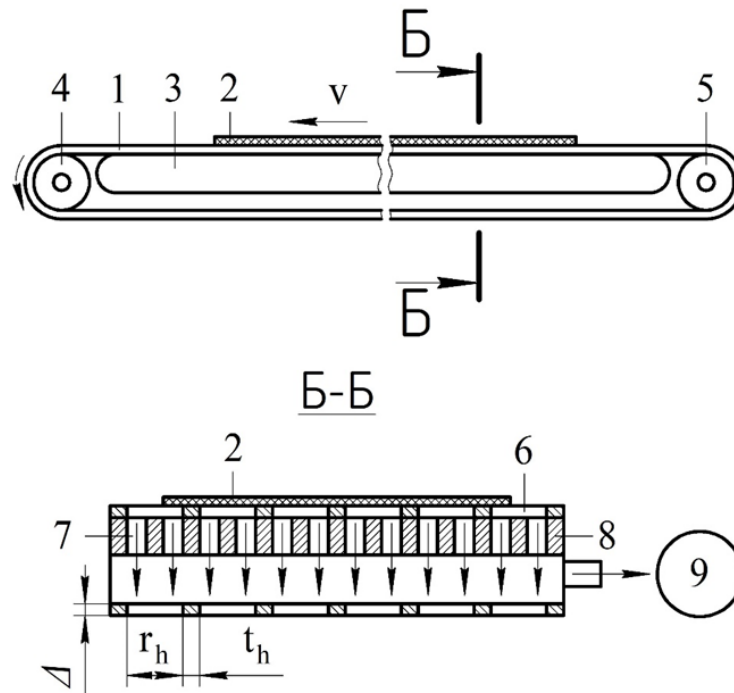


Рис. 5.3.1. Схема пристрою вакуумного транспортування розгортки інтегральної обкладинки: 1 – транспортувальна стрічка; 2 – розгортка інтегральної обкладинки; 3 – зона дії вакууму; 4 – ведучий барабан; 5 – ведений барабан; 6 – перфорована ділянка стрічки над вакуумною камерою; 7 – корпус вакуумної камери; 8 – фрагмент верхньої частини вакуумної камери; 9 – джерело розрідження (вакуумний насос/вентилятор); r_h – радіус отворів у стрічці; t_h – крок отворів; Δ – товщина стрічки [154]

Побудовано механіко-математичну модель процесу вакуумного транспортування розгортки інтегральної обкладинки транспортувальною стрічкою з отворами над нерухомою основою, з'єднаною з вакуумною магістраллю, яка реалізується у кілька послідовних етапів [154].

По-перше, формується геометрична та силова схема транспортувальної системи з урахуванням конструкції перфорованої стрічки та положення розгортки на ній [154].

По-друге, на основі цієї схеми виводяться рівняння для визначення рівнодійної сили вакуумного притиску та умов відсутності ковзання в поздовжньому напрямку [154].

По-третє, формується система критеріїв кутової стійкості розгортки під дією асиметричних вакуумних та інерційних сил.

По-четверте, встановлюються співвідношення, що зв'язують розрідження, геометричні та режимні параметри транспортувальної системи з допустимими відхиленнями позиціонування розгортки в зоні фальцювання [154].

Розглянемо плоску розгортку інтегральної обкладинки масою m , що транспортується із сталою швидкістю v гнучкою стрічкою товщиною Δ , яка має рівномірно розташовані отвори радіуса r_h з кроком t_h (рис. 5.3.1). Стрічка рухається над жорсткою нерухомою основою з отворами, з'єднаними через вакуумну камеру з джерелом розрідження [154].

Пристрій вакуумного транспортування розгортки інтегральної обкладинки (рис. 5.3.1) виконано у вигляді замкненої транспортувальної стрічки 1, що огинає ведучий 4 та ведений 5 барабани і рухається зі швидкістю v . На верхній гілці стрічки розміщується розгортка інтегральної обкладинки 2, яка переміщується в напрямку подальших операцій фальцювання та приклеювання клапанів. У центральній частині верхньої гілки передбачено зону дії вакууму 3, над якою утворюється ділянка гарантованого притиску розгортки до стрічки [154].

У перерізі Б–Б видно, що під транспортувальною стрічкою розташована вакуумна камера 7, закрита зверху перфорованою ділянкою стрічки 6. У тілі стрічки виконані отвори радіусом r_h і кроком t_h , через які розрідження з камери передається до нижньої поверхні розгортки 2, забезпечуючи рівномірний притиск по всій зоні контакту [154].

Товщина транспортувальної стрічки позначена Δ і визначає, зокрема, жорсткість стрічки та гідродинамічний опір повітряного потоку крізь перфорацію. Вакуумна камера 8 з'єднана з джерелом розрідження 9 через патрубок, що дозволяє підтримувати заданий рівень вакууму під час транспортування [154].

Вводимо декартову систему координат: вісь x спрямована вздовж напрямку руху стрічки, вісь y – поперек, вісь z – нормаль до площини стрічки, спрямована вгору. Центр мас розгортки позначимо через O_c [154].

Для побудови моделі приймаються такі основні допущення [154]:

- процес транспортування розглядається в квазістаціонарній постановці;
- розподіл розрідження у вакуумній камері вважається рівномірним, тобто $p_{vac} = const$;
- товщина розгортки істотно менша за її габаритні розміри, тому її можна розглядати як тонку пластину;
- деформаціями стрічки та заготовки в напрямку, перпендикулярному до площини транспортування, знехтувано на етапі опису утримання (вони враховуються в інших розділах моделі при згині клапанів);
- сили опору повітря беремо до уваги у вигляді зведеного збурювального навантаження [154].

5.3.2. Умова стійкого вакуумного утримання та відсутності поздовжнього ковзання

За цих допущень основним фактором, що забезпечує відсутність відриву та зсуву розгортки відносно стрічки, є рівнодіюча сила вакуумного притиску та сили тертя в площині контакту [154].

Нехай різниця між атмосферним тиском p_{atm} та у вакуумній камері p_{vac} дорівнює

$$\Delta p = p_{atm} - p_{vac} . \quad (5.3.1)$$

У зоні контакту розгортки зі стрічкою ефективна площа дії вакууму визначається сумарною площею отворів, що перекриті заготовкою. Якщо в даній зоні під розгорткою знаходиться n отворів радіуса r_h , то

$$A_{ef} = n\pi r^2 . \quad (5.3.2)$$

Вислідна сила вакуумного притиску, спрямована донизу до осі $z < 0$, становить

$$F_{vac} = \Delta p A_{ef} . \quad (5.3.3)$$

У реальних умовах частина отворів може бути частково перекрита, а також можливі витoki крізь зазори між стрічкою та основою. Тому доцільно врахувати коефіцієнт ефективності вакуумного утримання $\eta_v \in (0; 1]$, який узагальнює втрати тиску:

$$F_{vac}^* = \eta_v \Delta p A_{ef} . \quad (5.3.4)$$

Нормальна реакція опорної поверхні на розгортку дорівнює

$$N = F_{vac}^* + G , \quad G = mg , \quad (5.3.5)$$

де G – вага розгортки, g – прискорення вільного падіння. У більшості випадків при достатньому розрідженні виконується $F_{vac}^* \gg G$, тому масою можна знехтувати при оцінюванні нормальної сили (але її зручно залишити для загальності) [154].

Тангенціальна сила тертя в площині контакту (уздовж осі x) визначається як

$$F_{fr} = \mu N , \quad (5.3.6)$$

де μ – коефіцієнт тертя між матеріалом розгортки та поверхнею стрічки [154].

З іншого боку, під час зміни режимів (розгону, гальмування, проходження зони фальцювання) на розгортку діє збурювальна інерційна сила [154]

$$F_{in} = ma_x, \quad (5.3.7)$$

де a_x – миттєве прискорення руху розгортки вздовж осі x . Для стійкого без зсувного транспортування має виконуватися умова

$$F_{fr} \geq F_{in}, \quad (5.3.8)$$

або, з урахуванням (5)–(7),

$$\mu(\eta_v \Delta p A_{ef} + mg) \geq ma_x. \quad (5.3.9)$$

З (9) випливає необхідна умова щодо мінімального розрідження:

$$\Delta p \geq \frac{ma_x / \mu - mg}{\eta_v A_{ef}}. \quad (5.3.10)$$

Якщо припустити, що $F_{vac}^* \gg G$, то (10) спрощується до

$$\Delta p \gtrsim \frac{ma_x}{\mu \eta_v A_{ef}}. \quad (5.3.11)$$

Рівняння (10)–(11) пов'язують геометричні параметри транспортувальної системи r_h , t_h , n , режимні параметри a_x та фізико-механічні властивості системи m , μ із необхідним рівнем розрідження Δp . Графік (рис. 5.3.2) показує, як при наростанні розгонів/гальмувань швидко ростуть вимоги до розрідження [154].

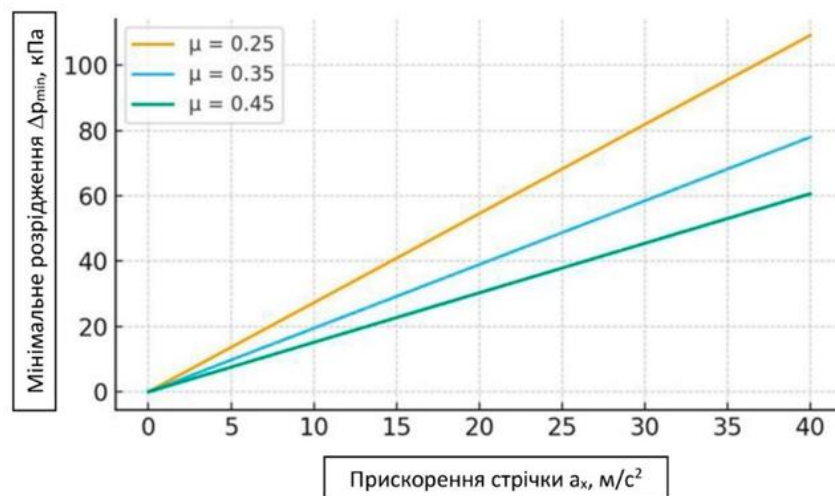


Рис. 5.3.2. Залежність мінімального розрідження від прискорення для різних коефіцієнтів тертя μ [154]

На рис. 5.3.3 наведено залежність мінімально необхідного розрідження Δp_{min} у вакуумній системі від прискорення транспортувальної стрічки a_x , розраховану за спрощеною формулою (5.3.11) для трьох значень коефіцієнта тертя $\mu=0,25; 0,35; 0,45$ [154].

По осі абсцис відкладено прискорення стрічки a_x , м/с² (діапазон 0–40), по осі ординат – мінімальне розрідження Δp_{min} , кПа. Кожна з трьох кривих відповідає своєму значенню коефіцієнта тертя μ , що дозволяє оцінити, як зміна умов контакту «розгортка – стрічка» впливає на вимоги до рівня вакууму при заданих режимах розгону/гальмування [154].

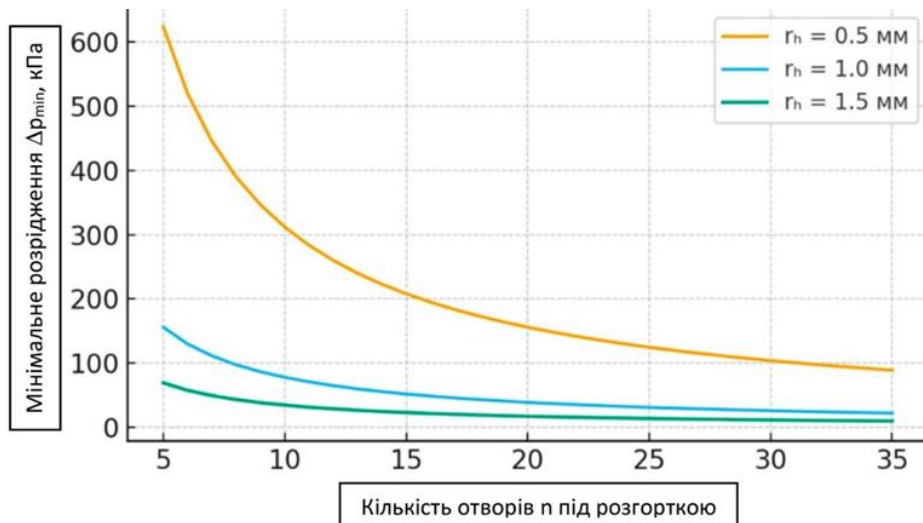


Рис. 5.3.3. Залежність Δp_{min} від кількості отворів і радіуса отворів [154]

Отримані співвідношення 5.3.10–5.3.11 реалізують одне з важливих завдань дослідження – встановлення зв'язку між мінімально необхідним розрідженням у вакуумній системі та конструктивними й режимними параметрами транспортувального механізму. Фактично ці рівняння задають аналітичну залежність $\Delta p_{min} = f(m, \mu, a_x, n, r_h)$, яка показує, як зміна маси розгортки, коефіцієнта тертя, дозволених прискорень розгону/гальмування, кількості та розмірів отворів відображається на вимогах до рівня розрідження. Це дозволяє на етапі проектування задавати раціональні параметри вакуумної

магістралі й геометрії перфорації стрічки для конкретних форматів обкладинок та швидкісних режимів роботи пристрою [154].

На рис. 5.3.3 показано залежність мінімально необхідного розрідження $\Delta p_{\min}$ у вакуумній системі від кількості отворів n , розташованих під розгорткою інтегральної обкладинки, для трьох значень радіуса отворів $r_h = 0,5; 1,0; 1,5$ мм. По осі абсцис відкладено кількість отворів n під розгорткою (діапазон 5–35), по осі ординат – мінімальне розрідження $\Delta p_{\min}$, кПа [154].

Розрахунки виконано для таких параметрів моделі: $m=0,03$ кг; $a_x=20$ м/с²; $\mu=0,35$; $\eta_{vac}=0,7$. Криві, що відповідають різним значенням r_h , демонструють, як збільшення кількості отворів та їхнього радіуса дає змогу зменшити необхідний рівень розрідження для забезпечення стійкого утримання розгортки [154].

5.3.3. Коефіцієнт запасу стійкості вакуумного утримання та інженерні критерії надійності

Для зручності аналізу вводиться коефіцієнт запасу стійкості утримання

$$K_{st} = \frac{\mu(\eta_v \Delta p A_{ef} + mg)}{ma_x}, \quad (5.3.12)$$

при цьому умова стійкого транспортування записується як

$$K_{st} \geq 1. \quad (5.3.13)$$

На практиці доцільно вимагати виконання нерівності

$$K_{st} \geq K_{st}^{min}, \quad (5.3.14)$$

де $K_{st}^{min} = 2 \div 3$ задає бажаний запас, що забезпечує стійку роботу пристрою при випадкових збуреннях (нерівномірність клейового шару, мікронерівності поверхні, флуктуації тиску у вакуумній камері тощо) [154].

На рис. 5.3.5. наведено залежність коефіцієнта запасу стійкості утримання K_{vac} від рівня розрідження Δp для трьох значень прискорення стрічки $a_x = 5; 15; 30$ м/с² [154].

По осі абсцис відкладено рівень розрідження Δp , кПа (діапазон 0–30), по осі ординат – коефіцієнт запасу стійкості утримання K_{vac} (безрозмірний). Розрахунки виконано для таких параметрів: $m = 0,03$ кг; $\mu = 0,35$; $\eta_{vac} = 0,7$; $n = 20$; $r_h = 1,0$ мм [154].

Розрахункові значення коефіцієнта запасу стійкості утримання K_{vac} для різних комбінацій рівня розрідження Δp та прискорення стрічки a_x , отримані за формулою (5.3.12), зведено в табл. 5.3.1 [154].

Таблиця 5.3.1.

Значення коефіцієнта запасу стійкості утримання K_{vac} залежно від рівня розрідження Δp та прискорення стрічки a_x

Δp , кПа	a_x , м/с ²	K_{vac}
0	5	0.687
0	15	0.229
0	30	0.114
5	5	1.200
5	15	0.400
5	30	0.200
10	5	1.713
10	15	0.571
10	30	0.285
15	5	2.226
15	15	0.742
15	30	0.371
20	5	2.739
20	15	0.913
20	30	0.457
25	5	3.252
25	15	1.084
25	30	0.542
30	5	3.765
30	15	1.255
30	30	0.628

Як видно з табл. 5.3.1, зі зростанням рівня розрідження Δp коефіцієнт K_{vac} збільшується, тоді як підвищення прискорення a_x призводить до зменшення запасу стійкості утримання. Для наочного відображення виявлених

закономірностей залежність $K_{vac}(\Delta p)$ для різних значень a_x подано на рис. 5.3.4. [154].

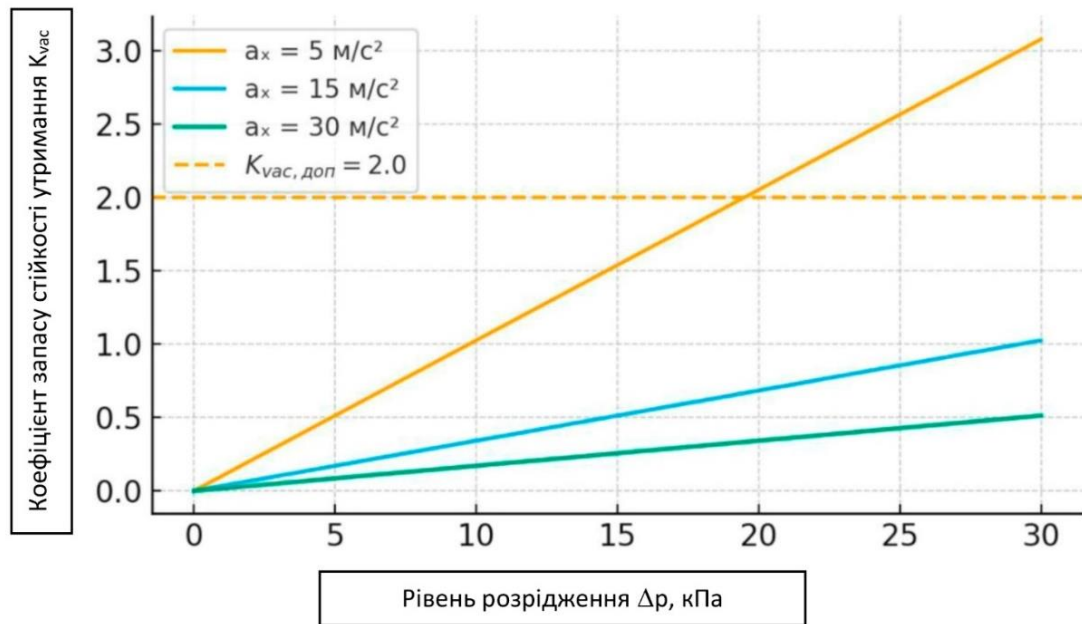


Рис. 5.3.4. Залежність коефіцієнта запасу стійкості утримання K_{vac} від рівня розрідження Δp для різних значень прискорення стрічки a_x ; пунктирною лінією показано мінімально допустимий запас $K_{vac, доп} = 2,0$ [154].

Запровадження коефіцієнта запасу стійкості утримання K_{vac} узгоджується з інженерною постановкою задачі й дозволяє перейти від перевірки одиничного режиму до аналізу запасу надійності в усьому діапазоні можливих збурень.

Для заданих параметрів розгортки й стрічки, а також для очікуваних прискорень $a_x(t)$, за співвідношеннями (5.3.12)-(5.3.14) можна обчислити фактичне значення K_{vac} і порівняти його з нормативним [154].

Якщо умова $K_{vac} \geq K_{vac, доп}$ не виконується, це означає необхідність корекції конструкції (зміни діаметра й кількості отворів, збільшення ефективної площі контакту) або режимів роботи (зниження максимальних прискорень, зміна швидкісного профілю розгону/гальмування). Таким чином, модель дає кількісні рекомендації щодо забезпечення стійкого утримання розгортки [154].

5.3.4. Аналіз кутової стійкості розгортки під дією асиметричних збурювальних моментів

Окрім умови відсутності ковзання в поздовжньому напрямку, важливим є забезпечення кутової стійкості розгортки, тобто недопущення її повороту відносно центру мас під дією асиметричних сил. Така асиметрія може виникати через нерівномірне розташування отворів, локальні сили згину клапанів, дії виправних елементів тощо [154].

Позначимо через F_i локальні сили вакуумного притиску, що діють у точках з радіус-векторами r_i відносно центра мас O_c . Тоді момент відносно центра мас дорівнює

$$M_{vac} = \sum_{i=1}^n r_i \times F_i . \quad (5.3.15)$$

За симетричного розподілу отворів і однорідного розрідження запас кутової стійкості визначається з умови, що приведений вакуумний момент M_{vac} перевищує збурювальний момент M_{dist} , який створюється силами згину клапанів, дією повітряного потоку, нерівномірним тертям:

$$M_{vac} \geq M_{dist} . \quad (5.3.16)$$

Аналогічно до (5.3.12) можна ввести коефіцієнт запасу кутової стійкості

$$K_{\varphi} = \frac{M_{vac}}{M_{dist}} , \quad (5.3.17)$$

для якого вимагається

$$K_{\varphi} \geq K_{\varphi}^{min} . \quad (5.3.18)$$

Величина K_{φ}^{min} вибирається з урахуванням допустимих кутових відхилень розгортки від номінального положення в зоні фальцювання та приклеювання [154]. Співвідношення (5.3.16)–(5.3.18) реалізують завдання кількісного опису кутової стійкості розгортки під час транспортування. Умови $M_{vac} \geq M_{dist}$, $K_{\varphi} \geq K_{\varphi, \partial on}$ окреслюють область параметрів, у якій асиметричні дії – згинальні зусилля від профільних фальцювальних планок, локальні сили від потоку

повітря, нерівномірний розподіл тертя – не призводять до повороту розгортки понад допустимий кут [154].

Це дає можливість уже на етапі проєктування задати верхні межі збурювальних моментів, які можуть виникати в зоні фальцювання та приклеювання, і відповідним чином підібрати геометрію перфорації, рівень розрідження та контурування зони дії вакууму [154].

Графічна інтерпретація залежності коефіцієнта запасу кутової стійкості від рівня розрідження для різних сценаріїв збурювальних моментів наведена на рис. 5.3.5 [154]. Показано залежність коефіцієнта запасу кутової стійкості розгортки K_ϕ від рівня розрідження Δp для трьох сценаріїв збурювальних моментів: симетричного навантаження згину клапанів, асиметричного згинання клапанів та згину з додатковим збуренням від повітряного потоку [154].

Зі зростанням Δp значення K_ϕ монотонно збільшується, однак для сценаріїв з більшим збурювальним моментом M_{dist} отримані криві розташовані нижче, що відображає зменшення запасу кутової стійкості. Пунктирною лінією позначено мінімально допустиме значення $K_{\phi, доп} = 2,0$, яке задає вимоги до рівня розрідження для кожного сценарію навантаження з точки зору запобігання повороту розгортки відносно поздовжньої осі [154].

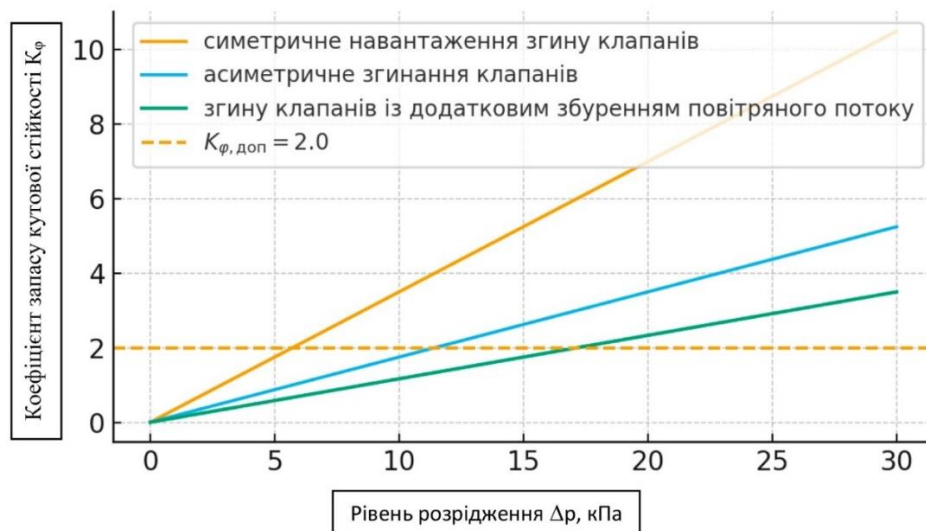


Рис. 5.3.5. Залежність коефіцієнта запасу кутової стійкості розгортки K_ϕ від рівня розрідження Δp для різних сценаріїв збурювальних моментів; пунктирною лінією показано мінімально допустимий запас $K = 2,0$ [154]

5.3.5. Оцінка точності поздовжнього позиціонування розгортки та узгодження з допусками фальцювання

Важливим показником є також поздовжнє позиціонування розгортки відносно зони фальцювання. Нехай поздовжнє зміщення центра мас розгортки відносно номінального положення дорівнює Δx . За умови однорідного руху стрічки без ковзання $\Delta x = 0$ [154]. У присутності випадкових збурень (змінне a_x , малі локальні прослизання) очікуване зміщення можна оцінити як

$$\Delta x \approx \int_0^{t_f} (v_{sheet}(t) - v_{belt}(t)) dt, \quad (5.3.19)$$

де t_f – час транспортування до зони фальцювання, v_{sheet} та v_{belt} – миттєві швидкості розгортки та стрічки відповідно. Розрізняючи ковзання, допустимо вважати, що відносне ковзання пропорційне відношенню інерційних сил до сил тертя, тобто

$$v_{sheet}(t) - v_{belt}(t) \sim \frac{F_{in}(t)}{F_{fr}(t)}. \quad (5.3.20)$$

Підставляючи (5.3.6), (5.3.7) у (5.3.20), маємо

$$v_{sheet}(t) - v_{belt}(t) \sim \frac{ma_x(t)}{\mu(\eta_v \Delta p A_{ef} + mg)}. \quad (5.3.21)$$

Тоді, з урахуванням (5.3.21), оцінка максимального поздовжнього зміщення набуває вигляду

$$|\Delta x| \lesssim \int_0^{t_f} \frac{m |a_x(t)|}{\mu(\eta_v \Delta p A_{ef} + mg)} dt. \quad (5.3.22)$$

З технологічної точки зору має бути виконана умова

$$|\Delta x| \leq \Delta x_{don}, \quad (5.3.23)$$

де Δx_{don} – допустиме поздовжнє відхилення позиції фальців відносно фальцювальних планок, що задається конструктивними допусками на розміщення клапанів і клейових зон [154].

На рис. 5.3.6 наведено залежність максимального поздовжнього зміщення розгортки Δx_{max} від часу транспортування до зони фальцювання t_f для трьох

рівнів розрідження $\Delta p = 15; 20; 25$ кПа. Видно, що зі збільшенням часу перебування розгортки на ділянці з прискореним рухом зміщення Δx_{max} зростає практично лінійно, тоді як підвищення рівня розрідження призводить до зменшення величини зміщення за рахунок збільшення сил притиску та, відповідно, ефективного тертя в парі «розгортка – стрічка». Це узгоджується зі співвідношеннями (5.3.19)–(5.3.22) і підтверджує можливість керування точністю позиціонування розгортки шляхом одночасної оптимізації часових параметрів транспортування та рівня вакууму [154].

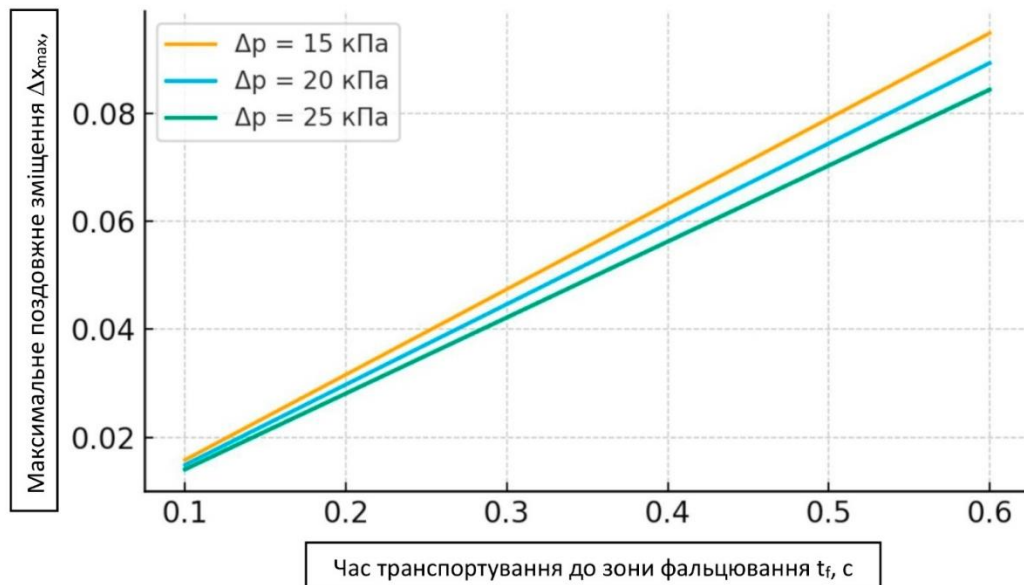


Рис. 5.3.6. Залежність максимального позовжнього зміщення розгортки Δx_{max} від часу транспортування до зони фальцювання t_f для різних рівнів розрідження Δp [154]

Оцінка максимального позовжнього зміщення Δx за формулами (5.3.19)–(5.3.22) безпосередньо пов’язує параметри руху транспортувальної стрічки з вимогами до точності розташування фальців. Нерівність (5.3.23) інтерпретується як умова сумісності динамічних режимів машини (профілю швидкості та прискорень) із конструктивними допусками на положення клапанів і клейових зон. Таким чином, виконується ще одне з поставлених завдань дослідження – забезпечення заданої точності позиціонування

розгортки в зоні взаємодії з фальцювальними планками для формування геометрично правильної інтегральної обкладинки [154].

5.3.6. Узагальнення розрахункових результатів і практичні рекомендації з проєктування вакуумної системи

На практичному рівні це означає, що система умов (5.3.13), (5.3.14), (5.3.18), (5.3.23) задає область допустимих значень параметрів Δ_p , A_{ef} , μ , $a_x(t)$, яка забезпечує стійке вакуумне утримання, кутову стійкість і точне позиціонування розгортки інтегральної обкладинки в транспортувальній підсистемі пристрою [154].

Сукупність отриманих співвідношень і критеріїв забезпечує досягнення поставленої мети дослідження – побудови механіко-математичної моделі процесу вакуумного транспортування розгортки інтегральної обкладинки, придатної для інженерного проєктування й оптимізації конструкції пристрою.

На основі цієї моделі можна розробляти алгоритми вибору параметрів вакуумної та пневматичної систем, перфорації стрічки та кінематичних режимів роботи машини з урахуванням вимог до стійкості утримання, кутової стійкості та точності позиціонування розгортки в зоні фальцювання й приклеювання клапанів. На основі отриманої механіко-математичної моделі та результатів розрахунків можна сформулювати низку практичних рекомендацій щодо проєктування вакуумної транспортувальної підсистеми [154].

По-перше, при заданих масі розгортки та швидкісних/прискорювальних режимах роботи пристрою рівень розрідження Δ_p і параметри перфорації стрічки (r_h , t_h , n) доцільно вибирати так, щоб забезпечувалася умова $K_{vac} \geq K_{vac, don}$, причому збільшення числа отворів і їхнього радіуса дозволяє зменшити необхідне розрідження [154].

По-друге, для запобігання повороту розгортки в зоні дії вакууму параметри розподілу отворів та конфігурацію камер слід узгоджувати з

максимально можливими збурювальними моментами згину клапанів та аеродинамічних впливів, забезпечуючи виконання умови $K_{\varphi} \geq K_{\varphi, \text{дон}}$ [154].

По-третє, профіль розгону та гальмування стрічки необхідно обмежувати з урахуванням оцінки максимального поздовжнього зміщення Δx , гарантуючи виконання нерівності $\Delta x \leq \Delta x_{\text{дон}}$, що пов'язана з допусками на положення клапанів і клейових зон [154].

Дотримання цих умов дає змогу на етапі проектування цілеспрямовано підбирати параметри вакуумної системи та перфорованої стрічки й тим самим підвищувати стійкість утримання розгортки та точність її позиціонування у фальцювально-клейовому модулі [154].

5.4. Екологічне обґрунтування та ресурсоощадний ефект удосконалення технології післядрукарської обробки інтегральних обкладинок

Екологічна орієнтація сучасних післядрукарських процесів у поліграфії ґрунтується не лише на заміні матеріалів на «екологічніші», а й на підвищенні стабільності технологічних операцій та довговічності зношувальних деталей обладнання, які визначають частоту переналаштувань, кількість пробних прогонів і рівень технологічних втрат. Для ліній виготовлення інтегральних обкладинок однією з таких груп деталей з підвищеним зношуванням є елементи фальцапарату, зокрема профільні фальцювальні планки, які працюють у режимі інтенсивного контактного навантаження та взаємодії з паперово-картонними і комбінованими матеріалами, клеями та продуктами зносу. Їхня деградація (зношування, зміна мікрогеометрії, локальні задири, втрата стабільності контакту) призводить до зростання кількості дефектів фальцювання та приклеювання клапанів, а отже – до збільшення технологічних відходів і додаткового навантаження на виробництво.

Удосконалення технології, запропоноване в дисертації, ґрунтується на керованому підвищенні ресурсу деталей фальцапарату шляхом формування

зміцнювального мікрорельєфу робочих поверхонь планок і оптимізації умов їх взаємодії з розгорткою інтегральної обкладинки.

Відповідно до виконаного математичного та чисельного моделювання, а також експериментальної перевірки, стабілізація мікрогеометрії робочої поверхні та узгодження контактних параметрів дозволяють зменшити ризик локальних концентрацій напружень, коливань коефіцієнта тертя та прискореного абразивно-адгезійного зносу.

Такий підхід має прямий ресурсощадний ефект: зростання довговічності планок зменшує частоту їх заміни та простої обладнання, скорочує потребу в коригувальних переналаштуваннях, і як наслідок – знижує частку браку та кількість повторних циклів обробки.

Екологічний ефект у цьому випадку реалізується через сукупність взаємопов'язаних механізмів. По-перше, зменшення технологічних відходів пов'язане зі зниженням кількості дефектів, типових для фальцювання інтегральних обкладинок: зміщення лінії згину, нерівномірний притиск у зоні клапана, розклеювання через нестабільність контакту, локальні заломы або пошкодження матеріалу.

Кожен дефект, що потребує вибраковування або переробки, означає додаткове споживання картону, клейових матеріалів, енергії, а також формування відходів, які потребують утилізації. Отже, підвищення експлуатаційної стабільності фальцапарату має екологічний ефект, співмірний з ефектом матеріалозаміщення, але реалізується без зміни рецептур клеїв чи складу матеріалів.

По-друге, ресурсощадження проявляється у скороченні непродуктивних витрат, пов'язаних із налаштуванням і підтриманням працездатності фальцювального вузла. Зношування планок і деградація їх робочої поверхні призводять до необхідності частішого регулювання притисків, коригування положення заготовки, підлаштування режимів нанесення клею та швидкостей транспортування.

Це супроводжується пробними прогонами та частковими серіями, які не можуть бути використані як готова продукція. Удосконалення зносостійкості робочих поверхонь і стабілізація параметрів контакту зменшують кількість таких операцій та забезпечують сталість якості упродовж довшого часу роботи між регламентними втручаннями.

По-третє, з екологічної точки зору важливим є те, що підвищення ресурсу деталей фальцапарату означає менше споживання матеріалів для виготовлення та заміни самих деталей, менше логістичних операцій, а також зменшення обсягів металевих відходів. У контексті поліграфічного виробництва цей ефект часто недооцінюється, однак для високошвидкісних ліній, де зношування інструмента відбувається інтенсивно, він має практичну значущість.

Додатковим чинником екологічної орієнтації технології, обґрунтованим у дисертації, є стабілізація позиціонування розгортки інтегральної обкладинки в зоні фальцювання за рахунок параметрів вакуумного утримання та транспортування. Стабільна подача і координування розгортки зменшують ймовірність зсувів у перехідних режимах і при зміні форматів, що безпосередньо скорочує кількість бракованих виробів і матеріальних втрат. У цьому сенсі поєднання зносостійкого інструмента (фальцювальні планки зі зміцненим мікрорельєфом) та стабільного транспортування (вакуумне утримання) формує комплексне технологічне рішення, в якому екологічний ефект досягається через підвищення керованості процесу і зменшення розсіювання параметрів якості.

Слід підкреслити, що запропонований ресурсоощадний підхід не суперечить вимогам до якості продукції, а навпаки – базується на їх забезпеченні. Зменшення технологічних відходів у даному випадку є наслідком не компромісу, а підвищення точності й стабільності фальцювання та приклеювання клапанів, підтвердженого результатами розрахункового аналізу та експериментальних досліджень.

Таким чином, екологічна орієнтація технології післядрукарської обробки інтегральних обкладинок у межах дисертації реалізується через довговічність і стабільність роботи деталей фальцапарату як інструмент ресурсощадження, що сприяє зменшенню обсягів браку, технологічних відходів і непродуктивних витрат без погіршення якості готової продукції.

5.5. Правова охорона та перспективи впровадження

Розроблений пристрій вакуумного транспортування і фальцювання клапанів інтегральних обкладинок захищено заявкою на винахід України № 18161/ЗА/25 від 05.09.2025 (рис. 5.5.1). У матеріалах заявки наведено формулу винаходу, креслення та опис, які відображають основні конструктивні ознаки пристрою: наявність вакуумної камери з перфорованою транспортувальною стрічкою, системи профільних зміцнених фальцювальних планок, а також режимів роботи, узгоджених із параметрами вакуумного утримання й умовами формування згину.

Пріоритетними ознаками пристрою, що визначають його новизну порівняно з відомими фальцювально-склеювальними модулями, є:

- інтеграція вакуумного транспортування розгортки інтегральної обкладинки з системою евольвентних або мікрорельєфно зміцнених фальцювальних планок;
- узгодження параметрів вакуумного утримання (рівень розрідження, площа перфорації, геометрія вакуумної камери) з допустимими зміщеннями розгортки $\Delta x_{\text{доп}}$ та коефіцієнтом запасу стійкості K_{vac} ;
- застосування пневматичного притискання в завершальній зоні фальцювання для стабілізації геометрії клапанів інтегральної обкладинки та зменшення частки бракованої продукції.

Перспективи впровадження розробленого пристрою пов'язані з:

- модернізацією наявних фальцювально-склеювальних ліній для виготовлення інтегральних обкладинок на поліграфічних підприємствах типу,

де впровадження вакуумного транспортування та зміцнених фальцювальних планок дозволяє зменшити частку браку та стабілізувати якість згину;

– адаптацією конструкції до інших типів поліграфічної продукції з клапанами (обкладинки журналів із клапанами, пакування з інтегрованими клапанами, POS-елементи), що розширює область застосування запропонованих технічних рішень;

– використанням отриманих результатів при розробленні нових поколінь фальцювально-клеювих модулів, у яких вакуумне транспортування, профільні мікрорельєфні планки та пневматичні притискні елементи розглядаються як єдина оптимізована система забезпечення точності суміщення та геометричної стабільності інтегральних обкладинок.

Форма В4



МІНЕКОНОМІКИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
«УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ОФІС
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ»
(УКРНОІВІ)

вул. Дмитра Голосева, 1, м. Київ, 01601, тел.: +380 44 209-27-06, +380 67 501-05-95
e-mail: office@nipo.gov.ua, https://www.nipo.gov.ua, код згільцю з ЄДРПОУ 44673629

05.09.2025 № 18161/3A/25

Стосується заявки № а 2025 04103
/ при листуванні просимо посилається на цей № /

Адреса для листування
Палюх Дмитро Олександрович, пр-кт
Берестейський, 68/1, кв. 17, м. Київ, 03113

Повідомлення про встановлення дати подання заявки на винахід (корисну модель)

(21) Реєстраційний номер заявки а 2025 04103

(71) Заявник(и)
КИРИЧОК ПЕТРО ОЛЕКСІЙОВИЧ, ПАЛЮХ ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ

(54) Назва винаходу
ПРИСТРІЙ ДЛЯ ФАЛЬЦЮВАННЯ І ПРИКЛЕЮВАННЯ КЛАПАНІВ ІНТЕГРАЛЬНИХ ОБКЛАДИНОК

Матеріали заявки відповідають вимогам статті 13 Закону України «Про охорону прав на винаходи і корисні моделі» (далі – Закон) щодо встановлення дати подання заявки на дату одержання Державною організацією «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій»:

- матеріалів заявки

Дата подання заявки 25.08.2025

Начальник сектору встановлення дати подання заявок  Любов ЛУЦЕНКО

Телефон 494-05-98

Експерт 1 категорії  Валерія ПОЛЩУК

Рис. 5.5.1. Повідомлення про встановлення дати подання заявки на винахід
(корисна модель)

Очікуваний техніко-економічний ефект від впровадження пристрою полягає у зниженні відсотка браку інтегральних обкладинок на $\Delta\beta$ %, підвищенні стабільності геометричних параметрів згину та можливості переходу до вищих робочих швидкостей лінії без погіршення якості фальцювання. Це створює передумови для подальшого дослідження й стандартизації оптимальних режимів роботи пристрою в умовах серійного та масового виробництва.

Таким чином, запропоновані конструктивно-технологічні рішення та алгоритм їх розрахункового обґрунтування формують комплексну основу для практичного впровадження розробки у складі ліній виготовлення інтегральних обкладинок. Модульність конструкції дозволяє реалізувати рішення як у вигляді модернізації окремих вузлів існуючих ліній, так і при проектуванні нових машин, забезпечуючи відтворюваність параметрів вакуумного утримання й синхронізацію транспортування за критеріями, визначеними у розділі 5.3 (стійкість коефіцієнта вакуумного утримання, точність позиціонування та узгодження швидкостей розгортки і стрічки).

Таким чином, у розділі 5 виконано перехід від установлених у попередніх розділах закономірностей контактної взаємодії та зносостійкості робочих поверхонь до конструктивної реалізації фальцювально-склеювального модуля, здатного забезпечувати стабільність формоутворення інтегральних обкладинок у високошвидкісних режимах.

Сформульовані технічні вимоги (стійке утримання розгортки, обмеження поздовжніх зміщень, однорідність контактного тиску та сумісність зі зміцненими профільними планками) визначили архітектуру запропонованого пристрою та склад його вузлів, а також принцип інтегрованої дії вакуумного транспортування й фальцювання.

Узагальнення розрахункових результатів у вигляді системи умов (стійкість вакуумного утримання, кутова стійкість і точність позиціонування) задає область допустимих параметрів вакуумної підсистеми та перфорації стрічки, що дозволяє здійснювати інженерний вибір рівня розрідження,

геометрії отворів і режимів прискорення/гальмування з урахуванням допусків фальцювання та вимог до якості склеювання клапанів.

Отримані конструктивно-технологічні рішення й алгоритм розрахункового обґрунтування формують завершену основу для практичного впровадження розробки у складі ліній виготовлення інтегральних обкладинок, а модульність конструкції забезпечує можливість реалізації як у форматі модернізації наявних вузлів, так і під час проєктування нових машин, з відтворюваністю параметрів вакуумного утримання та синхронізацією транспортування за визначеними критеріями.

Очікуваний практичний ефект полягає у зменшенні ризику зміщення розгортки та дефектів фальцювання, підвищенні стабільності формування згину і якості приклеювання клапанів та скороченні втрат матеріалів і часу на переналаштування. Важливо, що розробка має правову охорону (заявка на винахід України № 18161/3А/25 від 05.09.2025), а визначені пріоритетні ознаки підтверджують новизну технічного рішення й створюють передумови для подальшої дослідно-промислової апробації та масштабування.

Висновки до розділу 5

1. На основі аналізу технологічної схеми вакуумного транспортування розгорток інтегральних обкладинок визначено сукупність факторів, що впливають на стійкість утримання та точність позиціонування, і сформовано узагальнену геометричну та силову схему процесу як основу для подальшого моделювання.

2. Розроблено механіко-математичну модель вакуумного транспортування, яка враховує дію сил розрідження, ваги, тертя та інерційних навантажень, і на її основі отримано аналітичні співвідношення для мінімального рівня розрідження Δp_{min} та критерії лінійної й кутової стійкості руху у вигляді коефіцієнтів запасу K_{vac} та K_{φ} .

3. Виведено розрахункові залежності для оцінювання максимального поздовжнього зміщення розгортки Δx_{max} та сформульовано умову сумісності динамічних режимів транспортування з конструктивними допусками на позиціонування $\Delta x \leq \Delta x_{don}$, показавши можливість зменшення зміщень за рахунок оптимізації рівня розрідження і сил притиску.

4. За допомогою числового моделювання досліджено вплив геометричних (діаметр і крок отворів, кількість отворів під розгорткою) та режимних параметрів транспортувальної системи (рівень розрідження, прискорення, час транспортування) на величини Δp_{min} , K_{vac} , K_{φ} і Δx_{max} . Встановлено, що збільшення кількості та радіуса отворів дозволяє зменшити необхідне розрідження, тоді як зростання прискорень і збурювальних моментів вимагає підвищення вакууму або оптимізації геометрії перфорації для збереження необхідного запасу стійкості.

5. Сформульовано практичні рекомендації щодо раціонального вибору рівня розрідження, параметрів перфорованої транспортувальної стрічки та профілю прискорень. Виконання умов $K_{vac} \geq K_{vac, don}$, $K_{\varphi} \geq K_{\varphi, don}$ та $\Delta x \leq \Delta x_{don}$ забезпечує стійке утримання розгортки, кутову стійкість і задану точність

позиціонування в зонах фальцювання й приклеювання клапанів, що сприяє підвищенню стабільності роботи обладнання та якості готових обкладинок.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу підвищення стабільності якості інтегральних обкладинок як виду книжкової поліграфічної продукції шляхом технологічного забезпечення процесу фальцювання на основі керування контактною взаємодією у фальцювальному вузлі.

1. На основі аналізу технології виготовлення інтегральних обкладинок встановлено, що процес фальцювання є визначальною стадією післядрукарського формоутворення, на якій закладаються геометрична точність, симетрія зведення клапанів, зовнішній вигляд та передумови експлуатаційної надійності готової поліграфічної продукції. Показано, що характерні дефекти інтегральних обкладинок мають стійкий причинно-наслідковий зв'язок з умовами контактної взаємодії у фальцювальному вузлі.

2. Обґрунтовано доцільність використання лінійних і кутових показників зведення клапанів як універсальних кількісних критеріїв оцінювання геометричної якості інтегральних обкладинок, що дозволяє формалізувати оцінювання якості фальцювання у поліграфічному виробництві та перейти від якісного аналізу дефектів до кількісного контролю процесу.

3. Встановлено, що стабільність контактної взаємодії між розгорткою інтегральної обкладинки та профільними фальцювальними планками є визначальним чинником забезпечення повторюваності геометрії фальца, симетрії зведення клапанів і ефективності подальшого приклеювання крайок. Показано, що кінематична нестабільність транспортування та наявність клейових шарів у зоні фальцювання призводять до локальних концентрацій деформацій матеріалу обкладинок і підвищення ймовірності виникнення дефектів.

4. Розроблено та експериментально підтверджено механіко-математичні й FEM-моделі кінематичної деформації клапанів інтегральних обкладинок у процесі фальцювання, які враховують просторову геометрію профілю фальцювальних планок та умови контактної взаємодії. Моделі дозволили кількісно описати напружено-деформований стан матеріалу обкладинок і

визначити критичні зони, пов'язані з виникненням характерних дефектів фальцювання.

5. Запропоновано узагальнений підхід до оцінювання зносостійкості фальцювальних планок як елементів, що визначають стабільність поліграфічного процесу фальцювання, з урахуванням контактного тиску, шляху ковзання, температури та параметрів робочої поверхні. Показано, що використання плавних профілів, зокрема евольвентних, у поєднанні з керованими параметрами мікрогеометрії сприяє стабілізації контактної взаємодії та покращенню якості фальцювання інтегральних обкладинок.

6. Експериментально підтверджено ефективність цілеспрямованого формування зміцнювального мікрорельєфу на робочих поверхнях фальцювальних планок лазерними та механічними методами як засобу підвищення стабільності процесу фальцювання. Встановлено закономірності впливу параметрів обробки на геометрію поверхні та експлуатаційні характеристики, що безпосередньо відображається на якості готових інтегральних обкладинок.

7. Проведений порівняльний аналіз показав, що лазерні та механічні методи формування мікрорельєфу мають різні технологічні можливості та області доцільного застосування у поліграфічному виробництві, що дозволяє обґрунтовано обирати метод удосконалення робочих поверхонь фальцювальних планок залежно від умов експлуатації.

8. Сформульовано практичні рекомендації поліграфічного спрямування щодо вибору геометрії профілю фальцювальних планок, послідовності їх формоутворення, параметрів робочої поверхні та режимів транспортування розгорток, реалізація яких забезпечує стабільність процесу фальцювання, зменшення кількості дефектів і підвищення якості інтегральних обкладинок.

9. Отримані результати мають практичну значущість для поліграфічного виробництва і можуть бути використані при проєктуванні, модернізації та експлуатації фальцювально-склеювального обладнання для виготовлення книжкової продукції з інтегральними обкладинками, а також створюють

науково-методичну основу для подальших досліджень у сфері післядрукарських процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ ISO 14040:2013. Екологічне управління. Оцінювання життєвого циклу. Принципи та структура (ISO 14040:2006, IDT). – Київ, 2014. – 23 с.
https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_iso_14040_2013.pdf
2. Авдяков, Є. В., & Золотухіна, К. І. (2022). Аналітичний огляд сучасного стану технологій виготовлення гнучкого пакування та етикетки . *Технологія і техніка друкарства*, (3(77), 33–46. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(77\).2022.271804](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(77).2022.271804)
3. Марчук, І. В., & Золотухіна, К. І. (2022). Перспективні напрями розвитку поліграфічних матеріалів та технологій їх задруковування. *Технологія і техніка друкарства*, (4(78), 111–120. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(78\).2022.275291](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(78).2022.275291)
4. Nagasawa, S., Kaneko, S., & Adachi, D. (2019). Effects of rotational velocity and hold time at folding posture on time-dependent release behavior of creased white-coated paperboard. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 13(1), JAMDSM0004.
<https://doi.org/10.1299/jamdsm.2019jamdsm0004>
5. Vishnoi, M., Kumar, P., & Murtaza, Q. (2021). Surface texturing techniques to enhance tribological performance: A review. *Surface and Interfaces*, 25, 101463.
<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101463>
6. Dziadyk, Y., Paliukh, O., Kyrychok, P., Trishchuk, R., & Korobka, M. (2020). Defining technological features in the manufacture of semi-hard book covers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1(106)).
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208798>
7. Lev, R., Lyytikäinen, J., Matthews, S., Koppolu, R., Tanninen, P., & Leminen, V. (2024). Investigating the convertibility and barrier performance of a novel suberin dispersion coating during the paperboard creasing process. *Packaging Technology and Science*. <https://doi.org/10.1002/pts.2845>

8. Panek, J., & Hart, P. W. (2022). Review of coating cracking and barrier integrity on paperboard substrates. *TAPPI Journal*, 21(11), 589–603. <https://doi.org/10.32964/TJ21.11.589>

9. Lev, R., Lyytikäinen, J., Luoma, E., Tanninen, P., & Leminen, V. (2025). Convertibility and barrier performance of novel bio-based extrusion-coated paperboards. *Packaging Technology and Science*. <https://doi.org/10.1002/pts.2876>

10. Bonnet, N., et al. (2023). Reinforcing folding board boxes by printing a PLA grid pattern: Effect on creasing and folding. *Packaging Technology and Science*. <https://doi.org/10.1002/pts.2705>

11. Zhu, Y., Bousfield, D., & Gramlich, W. (2021). The influence of pigment modulus on failure resistance of paper barrier coatings. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 37(1). <https://doi.org/10.1515/npprj-2021-0052>

12. Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2025). Обґрунтування технологічних умов високоякісного фальцювання та приклеювання клапанів інтегральних обкладинок. *Технологія і техніка друкарства*, (4(90), 4–25.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(90\).2025.349593](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(90).2025.349593)

13. H. Itou, V. A. Kovtunen, and K. R. Rajagopal, A generalization of the Kelvin–Voigt model with pressure-dependent moduli in which both stress and strain appear linearly, *Math. Meth. Appl. Sci.* 46 (2023), 15641–15654. DOI 10.1002/mma.9417

14. Greenwood, J. A.; Williamson, J. B. P. Contact of nominally flat surfaces. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 295(1442), 300–319 (1966).

15. Рєгей І.І., Книш Р.О., Терновий А.М. Геометричний синтез та дослідження кінематичних параметрів штанцювального преса з натискним сегментом // Поліграфія і видавнича справа. 2023. № 2 (86). С. 163–173. DOI: 10.32403/0554-4866-2023-2-86-163-173

16. Рєгей І.І., Влах В.В., Михайлів Ю.Ю., Млинко О.І. Застосування двосекційної натискної плити у пресі штанцювального автомата: перспективи відмови від моноблочної конструкції // Наукові записки УАД. 2023. № 2 (67). С 239–248. DOI:10.32403/1998-6912-2023-2-67-239-248

17. Wang, T.-P., et al. *Shelf-Stable Bingham Plastic Polyurethane Thermosets for Additive Manufacturing*. ACS Materials Letters, 2024. DOI: 10.1021/acsmaterialslett.4c00175.
18. Carrà, S.; Pinoci, D. Fumed silica – Rheological additive for adhesives, resins, and paints. *Macromolecular Symposia*, 2002, 187:573–584. DOI: 10.1002/1521-3900(200209)187:1<573::AID-MASY573>3.0.CO;2-1.
19. Li, C.; Dickie, R. A. *Adhesive Dispensing Process Analysis: Steady-State Dispensing of One-Component Adhesives*. The Journal of Adhesion, 1991.
20. Xue, J. et al. Feasibility of Processing Hot-Melt Pressure-Sensitive Adhesive (HMPSA) with Solvent in the Lab, *Processes* 2021, 9(9), 1608; <https://doi.org/10.3390/pr9091608>.
21. Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2023). Аналіз впливу дискретного склеювання інтегральних обкладинок на процеси просторового профільного фальцювання. *Технологія і техніка друкарства*, (1(79), 4–23.
[https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(79\).2023.285537](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(79).2023.285537)
22. Anna Rudawska *Surface Treatment in Bonding Technology/ Anna Rudawska//ACADEMIC PRESS, Lublin, Poland, 2019, p. 7–46.*
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817010-6.00002-3>
- Jian S Dai *Stiffness Characteristics of Carton Folds for Packaging/ Jian S Dai, Ferdinando Cannella// Journal of Mechanical Design, Feb. 2014, 130(2): 022305 (7 pages).* <https://doi.org/10.1115/1.2813785>
23. Wei Yao *Reconfigurable Automation of Carton Packaging with Robotic Technology/ Wei Yao, Jian S. Dai// February 2012, In book: Robotic Systems – Applications, Control and Programming.*
<https://www.intechopen.com/chapters/27406>
24. Alexander Müller *Process development method for high-speed gluing and a battery-production casestudy/ Alexander Müller, Muhammed Aydemir, Sezer Solmaz, Arne Glodde, Franz Dietrich// 8th CIRP Conference of Assembly Technology and Systems, Procedia CIRP, 2021, Pages 117–122.*
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.212>

25. Claudia Anna Dohr Influence of paper properties on adhesive strength of starch gluing/ Claudia Anna Dohr, Ulrich Hirn// Nordic Pulp & Paper Research Journal, Volume 37 Issue 1, November 24, 2021.

<https://doi.org/10.1515/npprj-2021-0039>

26. Krainer, S. (2021) Contact angle measurement on porous substrates: Effect of liquid absorption and drop size/ S. Krainer, U. Hirn// *Colloids Surf. A, Physicochem. Eng. Asp.*, p. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126503>

27. Waldner C. Ultrasonic Liquid Penetration Measurement in Thin Sheets/ Carina Waldner, Ulrich Hirn// –Physical Mechanisms and Interpretation, June 2020, p. 1–18. <https://doi.org/10.3390/ma13122754>.

28. Zahra Dastjerdi Pressure sensitive adhesive property modification using cellulose nanocrystals/ Zahra Dastjerdi, Emily Dawn Cranston, Marc A. Dubé// *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Volume 81, March 2018, Pages 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.11.009>

29. Gorana Petković Enhancement of Polyvinyl Acetate (PVAc) Adhesion Performance by SiO₂ and TiO₂ Nanoparticles/ Gorana Petković, Marina Vukoje, Josip Bota, Suzana Pasanec Preprotić// *Coatings* 2019, 9, no. 11:707.

<https://doi.org/10.3390/coatings9110707>

30. Bardak, T. The effect of nano-TiO₂ and SiO₂ on bonding strength and structural properties of poly (vinyl acetate) composites /Bardak, T.; Tankut, A.N.; Tankut, N.; Sozen, E.; Aydemir, D.// *Measurement* 2016, 93, p. 80–85.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.004>

31. Ons Chaabouni Cellulose nanofibrils/polyvinyl acetate nanocomposite adhesives with improved mechanical properties/ Ons Chaabouni, Sami Boufi// *Carbohydrate Polymers*, Volume 156, 20 January 2017, Pages 64–70.

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.09.016>

32. Палюх, О. О. Теоретичні і практичні засади технологічного забезпечення якості книжкової продукції: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.01 – машини і процеси поліграфічного виробництва / Палюх Олександр Олександрович. – Київ, 2021. – 385 с.

<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/39944>

33. Persson, C., Eriksson, H., & Korin, C. (2023). The influence of creases on carton board package behavior during point loading. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 38(3). <https://doi.org/10.1515/npprj-2023-0021>

33.Jina, W., Nagasawa, S., Yamamoto, T., & Nagumo, T. (2023). Analysis of the folding behavior of a paperboard subjected to indentation of a deviated creasing rule using the finite element method. *AIMS Materials Science*, 10(2), 313–341.

<https://doi.org/10.3934/materci.2023017>

34.Nagasawa, S., Kaneko, S., & Adachi, D. (2019). Effects of rotational velocity and hold time at folding posture on time-dependent release behavior of creased white-coated paperboard. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 13(1), JAMDSM0004.

<https://doi.org/10.1299/jamdsm.2019jamdsm0004>

35.Vishnoi, M., Kumar, P., & Murtaza, Q. (2021). Surface texturing techniques to enhance tribological performance: A review. *Surface and Interfaces*, 25, 101463.

<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101463>

36.Dziadyk, Y., Paliukh, O., Kyrychok, P., Trishchuk, R., & Korobka, M. (2020). Defining technological features in the manufacture of semi-hard book covers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1(106)).

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208798>

37.Lev, R., Lyytikäinen, J., Matthews, S., Koppolu, R., Tanninen, P., & Leminen, V. (2024). Investigating the convertibility and barrier performance of a novel suberin dispersion coating during the paperboard creasing process. *Packaging Technology and Science*. <https://doi.org/10.1002/pts.2845>

38.Panek, J., & Hart, P. W. (2022). Review of coating cracking and barrier integrity on paperboard substrates. *TAPPI Journal*, 21(11), 589–603.

<https://doi.org/10.32964/TJ21.11.589>

39.Lev, R., Lyytikäinen, J., Luoma, E., Tanninen, P., & Leminen, V. (2025). Convertibility and barrier performance of novel bio-based extrusion-coated paperboards. *Packaging Technology and Science*. <https://doi.org/10.1002/pts.2876>

40. Bonnet, N., et al. (2023). Reinforcing folding board boxes by printing a PLA grid pattern: Effect on creasing and folding. *Packaging Technology and Science*.

<https://doi.org/10.1002/pts.2705>

41. Zhu, Y., Bousfield, D., & Gramlich, W. (2021). The influence of pigment modulus on failure resistance of paper barrier coatings. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 37(1). <https://doi.org/10.1515/npprj-2021-0052>

42. Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2025). Обґрунтування технологічних умов високоякісного фальцювання та приклеювання клапанів інтегральних обкладинок. *Технологія і техніка друкарства*, (4(90), 4–25.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(90\).2025.349593](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(90).2025.349593)

43. Ledesma-Alonso, R., et al. (2016). Stress concentration in periodically rough Hertzian contact. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 472(2194), 20160147. DOI:10.1098/rspa.2016.0235

44. Romasevych, Yu., Loveikin, V., & Malinevsky, O. (2022). The method of calculating the maximum torque when jamming the auger of the screw conveyor. *Machinery & Energetics*, 13(2), 83-90. DOI: 10.31548/machenergy.13(2).2022.83-90.

45. Volodymyr Dzyura Dynamics of relative torsional vibrations in the formation of a regular microrelief on internal cylindrical surfaces/Volodymyr Dzyura, Andrii Babii, Ihor Okipnyi, Dmytro Radyk, Ihor Tkachenko, Olha Myshkovych, Mariia Sokil, Vladyslav Sytarchuk// *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University* 2021, № 4 (104).

https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.04

46. Slavov S. Variability of Regular Relief Cells Formed on Complex Functional Surfaces by Simultaneous Five-Axis Ball Burnishing/ Slavov S., Dimitrov D., Iliev I.// *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering* 82. No. 3. August 2020. P. 195–206.

https://www.researchgate.net/publication/343696976_Variability_of_regular_relief_cells_formed_on_complex_functional_surfaces_by_simultaneous_five-axis_ball_burnishing

47. Volodymyr Dzyura Determining Optimal Parameters of Regular Microrelief Formed on the End Surfaces of Rotary Bodies / Volodymyr Dzyura, Pavlo Maruschak, Olegas Prentkovskis // Algorithms 2021, 14, 46. P. 1-18.

<https://doi.org/10.3390/a14020046>

48. Lesyk D. A. Combination of Laser Shock Peening with Cavitation, Shot and Ultrasonic Impact Hardening for Stainless Steels Surface Characteristics Improving/ D. A. Lesyk, H. Soyama, B. N. Mordyuk, O. Stamann, V. V. Dzhemelinskyi // Metallophysics and Advanced Technologies. 2022, vol. 44, No. 1, pp. 79–95. <https://doi.org/10.15407/mfint.44.01.0079>

49. Роїк, Т. А., Гавриш, О. А., Віцюк, Ю. Ю., & Бровкин, А. О. (2022). Імітаційна модель формування мікрорельєфу поверхні антифрикційних композитних деталей поліграфічної техніки при тонкому абразивному шліфуванні/ Роїк, Т. А., Гавриш, О. А., Віцюк, Ю. Ю., & Бровкин, А. О. // Технологія і техніка друкарства. (2022). (4(78), 87–101.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(78\).2022.280473](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(78).2022.280473)

50. Дудніков А. А. Зміцнення матеріалу деталей пластичним деформуванням / А. А. Дудніков, В. В. Дудник, О. І. Біловод, О. В. Іванкова, Т. Г. Лапенко // Наукові нотатки. – 2019. – Вип. 66. – С. 94-97.

http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2019_66_17.

51. Ковалевський С.В. та ін. Розробка та дослідження спеціальних методів обробки деталей машин/ Ковалевський С.В., Андронов О.Ю., Ковалевська О.С., Міранцов С.Л., Оніщук С.Г., Тулупов В.І., Гушкін А.В., Коржов С.О., Аносов В.Л., Борисенко Ю. Б.; Медведєв В.С.; Кошевой А.О. // Краматорськ: ДДМА, 2015. — 300 с. — ISBN: 978-966-379-722-9.

<https://www.twirpx.com/file/2440512/>

52. Rudenko, E. M. Nitriding in a helicon discharge as a promising technique for changing the surface properties of steel parts/ Rudenko, E. M. & Panarin, V. Ye. & Kyrychok, P. O. & Svavilnyi, M. Ye. & Korotash, I. V. & Palyukh, O. O. & Polotskyi, D. Yu. & Trishchuk, R. L. // (2019). Journal of Usp. Fiz. Met., 20, No. 3: 485–501.

DOI: <https://doi.org/10.15407/ufm.20.03.485>

53. 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, 4/1 (106) 2020, p. 80-90.

<https://journals.uran.ua/eejet/article/view/208798>

54. Сохань С. В. Применение алмазного композиционного термостойкого материала повышенной износостойкости для алмазного выравнивания стали 40х /С. В. Сохань, В. В. Возный, А. А. Шульженко, А. Н. Соколов, В. Г. Гаргин// Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сборник научных трудов. – Вып. 21. – Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2018, с. 193-199.

[http://www.ism.kiev.ua/images/%D0%A1%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%2021%20\(2018\).pdf](http://www.ism.kiev.ua/images/%D0%A1%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%2021%20(2018).pdf)

55. Гамзаєва Г. Вплив подачі та кількості проходів при алмазному вигладжуванні на шорсткість. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. (2022), (34), 16-22. <https://doi.org/10.15421/4222102>

56. Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2023). Дослідження процесів утворення мікрорельєфних напрямних на профільних пластинах для фальцювання інтегральних обкладинок. *Технологія і техніка друкарства*, (2(80), 4–23. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(80\).2023.292277](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(80).2023.292277)

57. Volodymyr Dzyura DYNAMICS OF REGULAR MICRORELIEF FORMATION ON INTERNAL CYLINDRIC SURFACES Scientific Journal of the Ternopil National Technical University, 2021, № 1 (101), p. 115–128.

https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.01

58. Loveikin V.S., Mishchuk D.O., Romasevych Yu.O. The movement mode optimization of the manipulator on the elastic base according to the criterion of the mean square value of the rate of change of the drive torque // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific and technical collected articles. – K.: KNUBA, 2023. – Issue 110. – P. 457-468. doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.457-468

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10584587.2023.2192664>

70. Danyleiko Oleksandr INCREASING THE EFFICIENCY OF SURFACE STRENGTHENING OF METAL PRODUCTS BY COMBINED THERMODEFORMATION PROCESSING/Danyleiko Oleksandr, Vitaliy Dzhemelinskyi, Dmytro Lesyk, Artemii Bernatskyi//Vibrations in engineering and technology, 2020, No 1 (96), p. 103–110.

https://www.researchgate.net/publication/347540875_INCREASING_THE_EFFICIENCY_OF_SURFACE_STRENGTHENING_OF_METAL_PRODUCTS_BY_COMBINED_THERMODEFORMATION_PROCESSING

71. 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, 4/1 (106) 2020, p. 80-90.

<https://journals.urau.ua/eejet/article/view/208798>

72. Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2023). Аналітичне дослідження дефектів мікрорельєфного зміцнення фальцювальних пластин при формуванні профілю. *Технологія і техніка друкарства*, (4(82)), 4–21.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(82\).2023.299085](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(82).2023.299085)

73. Tomasz Trzepieciński, Francesco dell'Isola, Hirpa G. (2021). Lemu Multiphysics Modeling and Numerical Simulation in Computer-Aided Manufacturing Processes, *Metals*, 11(1), 175.

<https://doi.org/10.3390/met11010175>

74. Morgan Görtz, Gustav Kettil, Axel Målvist, Mats Fredlund, Kenneth Wester and Fredrik Edelvik (2022). Network model for predicting structural properties of paper, *Nordic Pulp & Paper Research Journal*; 37(4): 712–724.

<https://doi.org/10.1515/npprj-2021-0079>

75. Tomasz Garbowski, Jakub Krzysztof Grabski, and Aleksander Marek (2021). Full-Field Measurements in the Edge Crush Test of a Corrugated Board—Analytical and Numerical Predictive Models. *Materials*, 14(11), 2840

<https://doi.org/10.3390/ma14112840>

76.Bernd Bickel, Moritz Bächer, Miguel A. Otaduy, Hyunho Richard Lee, Hanspeter Pfister, Markus Gross, and Wojciech Matusik (2023). Design and Fabrication of Materials with Desired Deformation Behavior. Seminal Graphics Papers: Pushing the Boundaries, Volume 2, Article No.: 86, Pages 829–838

<https://doi.org/10.1145/3596711.3596798>

77.Caiqin Xiao, Fengxin Sun, Mohammad Irfan Iqbal, Li Liu, Weidong Gao (2021). Mechanical characterization of surface wrinkling properties in fibrous sheet materials by facile folding process. Polymer Testing, Volume 97, 107153

<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107153>

78.Jarmo Kouko, Tomi Kankkunen, Miia Palmu, Jarkko Niiranen, Kirsi Peltonen (2023). Practical folding meets measurable paper properties. Materialia Volume 31, 101871. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2023.101871>

79.Ville Leminen, Arvo Niini, Panu Tanninen, Sami Matthews (2021). Comparison of creasing and scoring in the manufacturing of folding cartons. Procedia Manufacturing, Volume 55, Pages 221–225.

<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.10.031>

80.Yi Zhou, Wei Zhou and Guobin Xia (2023). Preparation and Innovative Design Applications of Paper-Based Aluminized Film. Coatings, 13(10), 1751.

<https://doi.org/10.3390/coatings13101751>

81.Gustav Marin, Prashanth Srinivasa, Mikael Nygård, Sören Östlund (2021). Experimental and finite element simulated box compression tests on paperboard packages at different moisture levels. Packaging Technology and Science, Volume 34, Issue 4. Pages 229-243. <https://doi.org/10.1002/pts.2554>

82.Kristofer Robertsson, Erik Jacobsson, Mathias Wallin, Eric Borgqvist, Matti Ristinmaa, Johan Tryding (2023). A continuum damage model for creasing and folding of paperboard. Packaging Technology and Science ,Volume36, Issue12. Pages 1037-1050. <https://doi.org/10.1002/pts.2774>

83.Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2024). Оптимізація чисельного аналізу для прогнозування деформацій обкладинок під час фальцювання. *Технологія і техніка друкарства*, (2(84), 4–20.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(84\).2024.309161](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(84).2024.309161)

84. Ortega J. M., Rheinboldt W. C. Iterative solution of nonlinear equations in several variables. New York : Academic Press, 1970. 572 p.

85. Won Chol Son Microstructure and wear resistance of Fe-Cr-C-Mo-VTi-N hardfacing layers/ Won Chol Son, Yong Gwang Jong, Myong Chol Pak, Jin Song Ma// Faculty of Materials Engineering, Kimchaek University of Technology, Pyongyang, 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.11402>

86. Guangsheng Zhang Effect of Energy Density on the Microstructure and Wear Resistance of Nickel-Based WC Coatings by Laser Cladding of Preset Zr702 Alloy Plates /Guangsheng Zhang, Aixin Feng, Pu Zhao, Xiaoming Pan, Huibin Feng// *Coatings* 2023, 13, 826. <https://doi.org/10.3390/coatings13050826>

87. D. Lesyk Influence of Multi-pin Ultrasonic Impact Treatment on Microrelief, Structure, and Residual Stress of AISI O2 Tool Steel/ D Lesyk, W Alnusirat, V Dzhemelinskyi, A Burmak, B Mordyuk// Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, 2022. pp. 435 – 434.

http://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_43

88. Chengsi Wang Microstructure and wear resistance property of laser clad CrCoNi coatings assisted by ultrasonic impact treatment/ Chengsi Wang, Ruifeng Li, Xiaolin Bi, Wuyan Yuan, Jiayang Gu, Jiao Chen, Mingjun Yan, Ziyu Zhang// Journal of Materials Research and Technology Volume 22, January–February 2023, Pages 853-864. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.170>

89. Jinrui Xiao Improved wear resistance of 440C steel ball via ultrasonic strengthening grinding process / Jinrui Xiao, Yiteng Zhang, Zhuan Zhao, Xincheng Xie, Zhongwei Liang// Journal of Materials Processing Technology, Volume 322, December 2023, 118198. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118198>

90. Çömez Nilay Effect of solutionizing and quenching treatment on Ti6Al4V alloy: a study on wear, cavitation erosion and corrosion resistance/ Çömez Nilay, Yurddaskal Melis, Durmuş Hülya// Journal of Materials Science, vol. 58, issue 24, June 2023. pp. 10201-10216.

https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2023JMatS..5810201C/doi:10.1007/s10853-023-08688-w

91.Laibo Sun Progress on the Effect and Mechanism of Ultrasonic Impact Treatment on Additive Manufactured Metal Fabrications/ Laibo Sun, Lujun Huang, Pengbo Wu, Ruisheng Huang, Naiwen Fang, Fujia Xu, Kai Xu//Crystals 2023, 13(7), 995. <https://doi.org/10.3390/cryst13070995>

92.Neha Bhadauria Wear and enhancement of wear resistance – A review/ Neha Bhadauria, Sunil Pandey, P.M. Pandey//Materialstogay: proceedings, Volume 26, Part 2, 2020, Pages 2986-2991. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.616>

93.Ying Wang Research Progress on the Wear Resistance of Key Components in Agricultural Machinery/Ying Wang, Dong Li, Cheng Nie, Pan Gong, Junsheng Yang, Zhigang Hu, Bin Li, Ming Ma// Materials 2023, 16(24), 7646.

<https://doi.org/10.3390/ma16247646>

94.X Zha Coupling mechanisms of static and dynamic loads during the ultrasonic impact strengthening of Ti-6Al-4V/X Zha, Z Yuan, H Qin, L Xi, B Guo, T Zhang, F Jiang// The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024,

<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-023-11676-8>

95.Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2024). Оптимізація чисельного аналізу для прогнозування деформацій обкладинок під час фальцювання. *Технологія і техніка друкарства*, (2(84), 4–20.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(84\).2024.309161](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(84).2024.309161)

96.Meng, Y., Xu, J., Ma, L., Jin, Z., Prakash, B., Ma, T. and Wang, W., (2022). *A review of advances in tribology in 2020–2021*. Friction, 10(10), pp.1443–1595.

<https://doi:10.1007/s40544-022-0685-7>

97.Zhu, X., Wang, X., & Wu, H. (2024). Calculation method and analysis of residual stress in the strip bending roller straightening process. Scientific Reports, 14, 9149. <https://doi:10.21203/rs.3.rs-3902940/v1>

98. Boazu, D., Gavrilesu, I. and Stan, F., (2024). Analytical and Finite Element Analysis of the Rolling Force for the Three-Roller Cylindrical Bending Process. *Materials*, 17(21), p.5230. <https://doi.org/10.3390/ma17215230>
99. Boru E., Aydın E., Sadid M. S. Investigation of bending behaviors of GFRP-strengthened steel RHS profiles with experimental and numerical models // *Buildings*. – 2023. – Vol. 13, No. 5. – P. 1216.
<https://doi.org/10.3390/buildings13051216>
100. Farioli D., Kaya E., Strano M. Flattening of bent metal sheets as a remanufacturing operation // *Journal of Remanufacturing*. – 2024. – Vol. 14, No. 2. – P. 293–314. <https://doi.org/10.1007/s13243-024-00146-3>
101. Li, Y., Wen, J., Lin, H., Yu, M. and Wang, F. (2022). Mathematical modelling of online warping height of cold-rolled thin strip steel. *International Journal of Steel Structures*, 22(4), pp.913–919.
<https://doi.org/10.1007/s13296-022-00615-0>
102. Yi, G., Wang, Z. and Hu, Z. (2020). A Novel Modeling Method in Metal Strip Leveling Based on a Roll-Strip Unit. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, Article ID 1486864, pages 1-16. DOI:10.1155/2020/1486864
103. Gribkov, E.P., Dobronosov, Y.K. and Kovalenko, A.K. (2023). Експериментальне дослідження процесу правки прокату на багатороликових правильних машинах. *Обробка матеріалів тиском*, 1(52), pp.138–144.
doi:10.37142/2076-2151/2023-1(52)138
104. Graça, A. and Vincze, G. (2021). A short review on the finite element method for asymmetric rolling processes. *Metals*, 11(5), p.762.
<https://doi.org/10.3390/met11050762>
105. Muraoka, T., Okude, Y., Kajikawa, S. and Kuboki, T. (2023). Effect of initial cross-sectional shape on bent shape in “Bending and Compression Method” for forming in-plane bent sheet metal. In: *Proceedings of the 14th International Conference on the Technology of Plasticity – Current Trends in the Technology of Plasticity*. Springer. doi:10.1007/978-3-031-42093-1_30

106.Li, L., Xie, H., Liu, T., Huo, M., Li, X., Liu, X., Wang, E., Li, J., Liu, H., Sun, L., Jiang, Z. (2022). Numerical analysis of the strip crown inheritance in tandem cold rolling by a novel 3D multi-stand FE model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **120**, 3683–3704.

<https://doi.org/10.1007/s00170-022-08997-5>

107.Yan, Z., Pan, S., Tang, Y. and Cao, W., 2024. Theoretical study of asymmetric bending force on metal deformation in cold rolling. *Metals*, 14(10), p.1168. <https://doi.org/10.3390/met14101168>

108.Haribabu, G. N., Yubero, D. C., Maawad, E., Faria, G. A., Staron, P., Schell, N., Ramadhan, R. S., Cabeza, S., Paecklar, A., Pirling, T., Withers, P. J., Roy, M. J. (2024). Benchmark Sample Design for the Validation of Residual Stress Measurements by Diffraction: Insights and Practicalities. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 13, 955–968.

<https://doi.org/10.1007/s40192-024-00385-z>

109.Silva, R. F., Coelho, P. G., Conde, F. M., Santos, B. R., & Oliveira, J. P. (2024). Minimizing the maximum von Mises stress of elastic continuum structures using topology optimization and additively manufactured functionally graded materials. *Computers & Structures*, 301, 107469.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2024.107469>

110.Roubíček, T., Tomassetti, G. (2023). Inhomogeneous finitely strained thermoplasticity with hardening by an Eulerian approach. *arXiv preprint*, arXiv:2304.05918. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.05918>

111.Carvalho, L. A. de, Lukács, Z. (2022). The role of friction in the sheet metal forming numerical simulation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1246(1), 012021.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1246/1/012021>

112.Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2024). Механіко-математичне моделювання процесу профілювання металевих планок для фальцювальних механізмів. *Технологія і техніка друкарства*, (4(86), 4–28.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(86\).2024.334868](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(86).2024.334868)

113. Xiao, H., Bruhns, O. T., & Meyers, A. A consistent finite elastoplasticity theory combining additive and multiplicative decomposition of the stretching and the deformation gradient. *International Journal of Plasticity*, 16(2), 143–177 (2000). DOI: 10.1016/S0749-6419(99)00045-5.
114. Laursen, T. A. *Computational Contact and Impact Mechanics: Fundamentals of Modeling Interfacial Phenomena in Nonlinear Finite Element Analysis*. Springer, 2003.
115. Cao, X., Wu, J., Zhong, G., Wu, J., Chen, X. (2024). Laser Shock Peening: Fundamentals and Mechanisms of Metallic Material Wear Resistance Improvement. *Materials*, 17 (4), 909. <https://doi.org/10.3390/ma17040909>
116. Li, X., Zhou, L., Zhao, T., Pan, X., Liu, P. (2022). Research on Wear Resistance of AISI 9310 Steel with Micro-Laser Shock Peening. *Metals*, 12 (12), 2157. <https://doi.org/10.3390/met12122157>
117. Praveenkumar, K., Swaroop, S., Manivasagam, G. (2022). Effect of multiple laser peening on microstructural, fatigue and fretting-wear behaviour of austenitic stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 443, 128611. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128611>
118. Lesyk, D. A., Martinez, S., Mordyuk, B. N., Dzhemelinskyi, V. V., Lamikiz, A., Prokopenko, G. I. et al. (2020). Combining laser transformation hardening and ultrasonic impact strain hardening for enhanced wear resistance of AISI 1045 steel. *Wear*, 462-463, 203494. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203494>
119. Wang, C., Li, R., Bi, X., Yuan, W., Gu, J., Chen, J. et al. (2023). Microstructure and wear resistance property of laser clad CrCoNi coatings assisted by ultrasonic impact treatment. *Journal of Materials Research and Technology*, 22, 853–864. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.170>
120. Karamimoghdam, M., Rezayat, M., Moradi, M., Mateo, A., Casalino, G. (2024). Laser Surface Transformation Hardening for Automotive Metals: Recent Progress. *Metals*, 14 (3), 339. <https://doi.org/10.3390/met14030339>

121.Niketh, S., Samuel, G. L. (2019). Hybrid Micro Textures – A Multi-Scale Surface Engineering Approach For Enhancing Tribological Characteristics. Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 14 (3).

<https://doi.org/10.2961/jlmn.2019.03.0006>

122.Yuan, S., Lin, N., Wang, W., Zhang, H., Liu, Z., Yu, Y. et al. (2022). Correlation between surface textural parameter and tribological behaviour of four metal materials with laser surface texturing (LST). Applied Surface Science, 583, 152410. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.152410>

123.Karamimoghadam, M., Moradi, M., Azami, M. (2022). A comparative investigation of different overlaps of the diode laser hardening in low-carbon steel and stainless steel. Optik, 251, 168093. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.168093>

124.Masood Arif Bukhari, S., Husnain, N., Arsalan Siddiqui, F., Tuoqeer Anwar, M., Abbas Khosa, A., Imran, M. et al. (2023). Effect of laser surface remelting on Microstructure, mechanical properties and tribological properties of metals and alloys: A review. Optics & Laser Technology, 165, 109588.

<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109588>

125. Kyrychok, T., Nazarenko, O., Korotenko, O., Klymenko, T., & Talimonova, N. (2024). Determining the influence of technological parameters of the laser processing of plastic cards edges on improving their wear resistance. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(1 (132)), 84–94. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.317448>

126. Киричок, Т. Ю., Коротенко, О. В., Баглай, В. А., Коротенко, В. В., & Дорошук, В. Р. (2025). Удосконалення інтегрального оцінювання якості форм інтагліодруку, виготовлених прямим лазерним гравіюванням. Технологія і техніка друкарства, (1(87)), 107–121. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(87\).2025.338863](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(87).2025.338863)

127. Kyrychok, P., Paliukh, D. (2024). Determining of the effect of reinforcing microrelief guides on the efficiency of folding integrated covers. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (1 (130)), 97–111.

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309481>

128. Струтинський, В. Б. (2025). Підвищення зносостійкості профільних деталей брошурувального обладнання шляхом нанесення мікрорельєфу методом ультразвукового накатування. *Технологія і техніка друкарства*, (1(87)), 16–35. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(87\).2025.338218](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(87).2025.338218)

129. Kyrychok, P., Paliukh, D. (2024). Determining of the effect of reinforcing microrelief guides on the efficiency of folding integrated covers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (130)), 97–111.

<https://journals.uran.ua/eejet/article/view/309481>

130. Дзюра, В.О., Марущак П.О., Семеген В.О., Головка В.В., Федів В.Я. (2023). Обґрунтування параметрів регулярних мікрорельєфів сформованих на плоских поверхнях. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39), ч.І. С. 37-47.

<https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/402f7b6a-08ec-454c-9785-97fce416623b/content>

131. Тулупов, В., & Онищук, С. (2021). Дослідження технологій поверхневого зміцнення деталей машин. *Технічні науки та технології*, (3(25)), 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)

132. Посувайло В.М., Шовкопляс М. В., Романів, М.М., Малінін, В.Ю. (2021). Порівняння методів поверхневого зміцнення деталей машин покриттями. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки*. №4/2021. С. 83–97. <https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/4004>

133. Максимук О. В. (2020). Особливості контактної взаємодії і зношування тонкостінних елементів конструкцій. *Мат. методи та фіз.-мех. поля*. – 63, № 1. – С. 133-148.

http://www.iapmm.lviv.ua/journal/631_pdf/631_10.pdf

134. Slavov, S. D., Dimitrov, D. M., Mincheva, D. Y., Dzyura, V., Maruschak, P., & Semehen, V. (2025). Microstructure and Microhardness Research of Steel 304 After Forming Partially Regular Reliefs by Ball Burnishing Operation. *Materials*, 18(7), 1565. <https://doi.org/10.3390/ma18071565>

135.Zhang, L., & Wu, Z. (2023). A mini-review of surface severe plastic deformation methods and their effects on steel and stainless steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 237(8), 1771–1783.

<https://www.citedrive.com/en/discovery/a-mini-review-of-surface-severe-plastic-deformation-methods-and-their-effects-on-steel-and-stainless-steel/>

136.Shan Cecilia Cao, Xiaochun Zhang, Jian Lu, Yongli Wang, San-Qiang Shi, Robert O. Ritchie. (2019). Predicting surface deformation during mechanical attrition of metallic alloys. *npj Computational Materials*, 5, 36.

<https://doi.org/10.1038/s41524-019-0171-6>

137.Zhang, Y., Li, X., & Wang, Z. (2024). Indentation Deformation Mechanism of Combined-Strengthened Modified Layer in Low-Alloy Steel Under Hydrogen Influence. *Wear*, 542, 204625.

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2025Corro.24212579W/abstract>

138.Luo, Q., & Kitchen, M. (2023). Microhardness, Indentation Size Effect and Real Hardness of Plastically Deformed Austenitic Hadfield Steel. *Materials*, 16(3), 1117. <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/3/1117>

139.Shen, Z., Su, Y., Liang, Z., & Long, X. (2024). Review of indentation size effect in crystalline materials: Progress, challenges and opportunities. *Journal of Materials Research and Technology*, 31, 117–132.

<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.071>

140. Киричок, Т. Ю., Коротенко, О. В., & Коротенко, В. В. (2023). Удосконалення методу визначення товщини фарбового шару інтагліодруку. *Технологія і техніка друкарства*, (2(80), 24–34.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(80\).2023.290558](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(80).2023.290558)

141.Kyrychok, P., & Paliukh, D. (2025). Construction of a physical-mechanical model of reinforcing microrelief formation on profiled strips made of AISI 1005 and AISI 347 steels considering surface topology. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(1 (135), 17–29.

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.331742>

- 142.Струтинський, В. Б. (2024). Фізико-механічне моделювання поверхневого зміцнення деталей фальцювальних систем пентагональними і гексагональними інденторами. *Технологія і техніка друкарства*, (4(86), 42–65.
[https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(86\).2024.332807](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(86).2024.332807)
143. Pearson, K. (1909). *Determination of the Coefficient of Correlation*. *Science*, 30(757), 23–25. DOI: 10.1126/science.30.757.23
144. Gabriel, F., Fahning, M., Meiners, J., Dietrich, F., & Dröder, K. (2020). Modeling of vacuum grippers for the design of energy efficient vacuum-based handling processes. *Production Engineering*, 14, 545–554.
<https://doi.org/10.1007/s11740-020-00990-9>
- 145.Регей І.І., Книш О.Б., Бегень П.І., Михайлів Ю.Ю. Аналітичні дослідження силового навантаження привода натискної плити у штанцювальному пресі // *Технічні науки та технології*. 2024. № 3 (37). С. 37-44. DOI:10.25140/2411-5363-2024-3(37)-37-44
- 146.Yang, R., Zhong, W., Wang, R., Li, C., & Fang, J. (2020). Integration of measurement and simulation of film pressure for estimating deformation of a glass sheet on a noncontact air conveyor. *Mechanical Engineering Science*, 2(2), 35–42.
<https://doi.org/10.33142/mes.v2i2.3164>
- 147.Song, B., Chen, H., Sun, L., Xu, K., & Ren, X. (2024). Improved method for the calculation of the air film thickness of an air cushion belt conveyor. *Materials*, 17, 6020. <https://doi.org/10.3390/ma17236020>
- 148.Zhang, B., Meng, W., & Zhang, H. (2022). Research on the pressure field and loading characteristics of air film of air cushion belt conveyor. *AIP Advances*, Volume 12, Issue 9, 095123. <https://doi.org/10.1063/5.0111304>
- 149.Sarsenova, G., Joldassova, K., & Sultanaliev, B. (2024). Research and development of a special air-cushion conveyor design for the transportation of bulk cargoes. *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*, 26(4), B244–B251. <https://doi.org/10.26552/com.C.2024.045>

150.Yu X., Li X. (2021) Theoretical modeling and experimental study of pressure fields of inclined airflow film. *Precision Engineering*, 67, 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.09.014>

151.Іванко, А. І., & Пасічник, В. П. (2020). Моделювання процесу витрат повітря у камері пневмомарзана ротаційного висікального модуля. *Технологія і техніка друкарства*, 1–2(67–68), 29–37. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.1-2\(67-68\).2020.205764](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1-2(67-68).2020.205764)

152.Zeng, F., Yan, C., Wu, Q., & Wang, T. (2020). Dynamic behaviour of a conveyor belt considering non-uniform bulk material distribution for speed control. *Applied Sciences*, 10(13), 4436. <https://doi.org/10.3390/app10134436>

153.Chen, H., & Liu, S. (2023). Establishment of constitutive model and dynamic parameter analysis of rubber conveyor belt. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 61(2), 365–378. <https://doi.org/10.15632/jtam-pl/163246>

154. Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2025). Механіко-математичне моделювання процесу вакуумного транспортування розгортки інтегральної обкладинки. *Технологія і техніка друкарства*, (3(89), 4–21. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(89\).2025.345764](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(89).2025.345764)

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А1. ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Публікації у наукових виданнях, включених до наукометричної бази Scopus:

1. Kyrychok, P., Paliukh, D. (2024). Determining of the effect of reinforcing microrelief guides on the efficiency of folding integrated covers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (130)), 97–111.

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309481>

2. Kyrychok, P., & Paliukh, D. (2025). Construction of a physical-mechanical model of reinforcing microrelief formation on profiled strips made of AISI 1005 and AISI 347 steels considering surface topology. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(1 (135), 17–29.

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.331742>

Публікації у фахових наукових виданнях України:

3. Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2023). Аналіз впливу дискретного склеювання інтегральних обкладинок на процеси просторового профільного фальцювання. *Технологія і техніка друкарства*, (1(79), 4–23.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(79\).2023.285537](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(79).2023.285537)

4. Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2023). Дослідження процесів утворення мікрорельєфних напрямних на профільних пластинах для фальцювання інтегральних обкладинок. *Технологія і техніка друкарства*, (2(80), 4–23.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(80\).2023.292277](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(80).2023.292277)

5. Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2023). Аналітичне дослідження дефектів мікрорельєфного зміцнення фальцювальних пластин при формуванні профілю. *Технологія і техніка друкарства*, (4(82), 4–21.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(82\).2023.299085](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(82).2023.299085)

6. Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2024). Дослідження впливу геометрії профілю та мікрорельєфного зміцнення на зносостійкість фальцювальних пластин. *Технологія і техніка друкарства*, (1(83), 4–17.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(83\).2024.305494](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(83).2024.305494)

7.Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2024). Оптимізація чисельного аналізу для прогнозування деформацій обкладинок під час фальцювання. *Технологія і техніка друкарства*, (2(84), 4–20.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(84\).2024.309161](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(84).2024.309161)

8.Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2024). Механіко-математичне моделювання процесу профілювання металевих планок для фальцювальних механізмів. *Технологія і техніка друкарства*, (4(86), 4–28.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(86\).2024.334868](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(86).2024.334868)

9.Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2025). Механіко-математичне моделювання процесу вакуумного транспортування розгортки інтегральної обкладинки. *Технологія і техніка друкарства*, (3(89), 4–21.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(89\).2025.345764](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(89).2025.345764)

10.Киричок, П. О., & Палюх, Д. О. (2025). Обґрунтування технологічних умов високоякісного фальцювання та приклеювання клапанів інтегральних обкладинок. *Технологія і техніка друкарства*, (4(90), 4–25.

[https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(90\).2025.349593](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(90).2025.349593)

Публікації у збірниках матеріалів конференцій:

11.Киричок П. О., Палюх Д. О. (2023). Виявлення особливостей застосування клейових апаратів дискретного нанесення клею для виготовлення обкладинок. Поліграфічні, мультимедійні та web-технології: тези доп. VIII Міжнар. наук.-техн. конф. (16-20 травня 2023, м. Харків. – С. 27-29.

<https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/15943/1/Tezisy-konferenciya%20%20PMW-2025.pdf>

12.Киричок П. О., Палюх Д. О. Виявлення особливостей застосування фальцювальних пластин із заданим профілем для виготовлення інтегральних обкладинок. XII International scientific and practical conference «Scientific Theories and Practices as an Engine of Modern Development» (February 28 – March 1, 2024) Bratislava, Slovakia, International Scientific Unity. 2024. 304 p. – P. 282-285.

[https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/02/Scientific theories and practices as an engine of modern development.pdf](https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/02/Scientific_theories_and_practices_as_an_engine_of_modern_development.pdf)

13.Киричок П. О., Палюх Д. О. Порівняльний аналіз фальцювальних пластин з осьовим вигином на 90° та евольвентною кривою в полвіграфічному виробництві. 1st International Scientific and Practical Conference "Scientific Exploration: Bridging Theory and Practice" October 14-16, 2024 Berlin, Germany. – P.150–154.

https://www.eoss-conf.com/wp-content/uploads/2024/10/Berlin_Germany-14.10.24.pdf

14.Киричок П. О., Палюх Д. О. Удосконалення поверхневого шару профільних фальцювальних пластин. IV Міжнародна науково-практична конференція «Innovative research and perspectives of the development of science and technology». 29-31 січня 2024 р., Стокгольм, Швеція. – P. 377–380.

<https://eu-conf.com/events/innovative-research-and-perspectives-of-the-development-of-science-and-technology/>

15.Палюх Д. О. Оптимізація фальцювання інтегральних інтегральних обкладинок криволінійними планками. VI Міжнародна науково-практична конференція студентів, магістрантів та аспірантів «Квалілогія книги». (Львів, 3 квітня 2025 р.). – С. 161–163.

https://lpnu.ua/events/vi-mizhнародna-naukovo-praktychna-konferentsiia-studentiv-mahistrantiv-ta-aspirantiv?utm_source=chatgpt.com

16. Киричок П. О., Палюх Д. О. Вплив лазерного мікрорельєфного зміцнення на фізико-хімічні властивості фальцювальних планок зі сталі AISI 347. X Міжнародна науково-технічна конференція «Поліграфічні, мультимедійні та web-технології» 14-17 травня 2025 року. м. Харків, Україна. – С. 69–71.

<file:///C:/Users/ASUS/Downloads/Tezisy-konferenciya%20%20PMW-2025.pdf>

17.Киричок П. О., Палюх Д. О. Аналіз фізико-хімічних процесів поверхневого зміцнення профільних фальцювальних планок //XXIV International Scientific and Practical Conference “Effectiveness of phytoremediation as a method for soil restoration from petroleum products in the eastern regions of Ukraine”, Zaragoza, Spain, June 16–18, 2025. – P. 241–245.

<https://eu-conf.com/en/events/latest-theories-and-technologies-for-the-development-of-scientific-research/>

ДОДАТОК А2. ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні результати дисертації доповідались та обговорювались на:

– звітних науково-технічних конференціях професорсько викладацького складу, наукових працівників і аспірантів навчально-наукового видавничо-поліграфічного інституту КПІ ім. Ігоря Сікорського (Київ, 2022 – 2026);

– VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Поліграфічні, мультимедійні та web-технології» (16-20 травня 2023, м. Харків).

– XII International scientific and practical conference «Scientific Theories and Practices as an Engine of Modern Development» (February 28 – March 1, 2024) Bratislava, Slovakia, International Scientific Unity. 2024).

– 1st International Scientific and Practical Conference "Scientific Exploration: Bridging Theory and Practice" (October 14-16, 2024 Berlin, Germany).

– IV Міжнародній науково-практичній конференції «Innovative research and perspectives of the development of science and technology». (29-31 січня 2024 р., Стокгольм, Швеція).

– VI Міжнародній науково-практичній конференції студентів, магістрантів та аспірантів «Квалілогія книги». (Львів, 3 квітня 2025 р.).

– X Міжнародній науково-технічній конференції «Поліграфічні, мультимедійні та web-технології» (14-17 травня 2025 року. м. Харків).

– XXIV International Scientific and Practical Conference “Effectiveness of phytoremediation as a method for soil restoration from petroleum products in the eastern regions of Ukraine”, (Zaragoza, Spain, June 16–18, 2025).

ДОДАТКИ Б. АКТИ ВПРОВАДЖЕНЬ

АКТ

дослідно-промислового впровадження результатів дисертаційної роботи

Даний акт констатує, що в умовах ТОВ «Виробничо-комерційне підприємство «СТ-ДРУК»» проведено дослідно-промислову апробацію та впровадження основних положень дисертаційної роботи Палюха Дмитра Олександровича, присвяченої розробленню та науковому обґрунтуванню комплексної технології забезпечення якості та довговічності процесу фальцювання інтегральних обкладинок шляхом оптимізації геометрії профільних фальцювальних планок та формування зміцнювального мікрорельєфу на робочих поверхнях.

У межах дослідно-промислового впровадження на виробничій дільниці післядрукарської обробки підприємства були реалізовані такі положення дисертаційного дослідження:

- вибір геометрії профілю фальцювальних планок з урахуванням товщини, жорсткості та фізико-механічних характеристик матеріалів інтегральних обкладинок;
- застосування рекомендацій щодо нанесення зміцнювального мікрорельєфу;
- удосконалення режимів роботи фальцювального вузла з метою стабілізації контактної взаємодії в зоні згину клапанів.

У процесі виробничих випробувань підтверджено, що використання планок із керовано сформованими мікрорельєфними напрямними забезпечує:

- підвищення стабільності геометрії фальців інтегральних обкладинок;
- зменшення проявів локальних деформацій і пошкоджень матеріалу в зоні згину;
- зниження кількості дефектів, пов'язаних із перекосом клапанів і нерівномірністю фальцювання;

За результатами дослідно-промислової апробації встановлено тенденцію до зменшення частоти технологічних зупинок, пов'язаних із регулюванням фальцювального вузла, а також до зниження рівня виробничого браку при виготовленні інтегральних обкладинок різних форматів.

Отримані результати підтверджують практичну доцільність застосування розроблених у дисертаційній роботі технологічних підходів у виробничих умовах та їх відповідність вимогам сучасного поліграфічного виробництва щодо стабільності, довговічності та ресурсозбереження.

Результати дослідження рекомендовано до подальшого використання в діяльності ТОВ «СТ-ДРУК» при виготовленні книжково-журнальної продукції з інтегральними обкладинками.

Можливий річний економічний ефект від впровадження комплексної технології забезпечення якості процесу фальцювання інтегральних обкладинок 36 200 (тридцять шість тисяч двісті) гривень.

ВИКОНАВЕЦЬ:

НН ВПІ КПІ ім. Ігоря Сікорського

Директор

Киричок П. О.

Аспірант

Палюх Д. О.

ЗАТВЕРДЖУЮ:

ТОВ «СТ-ДРУК»

Директор

Щобачук П. О.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Т.в.о. директора навчально-наукового

видавничо-поліграфічного інституту

КПІ ім. Ігоря Сікорського

Катерина ЗОЛОТУХІНА

14 січня 2026 р.



АКТ

про використання в навчальному процесі результатів дисертаційної роботи Палюха Дмитра Олександровича

Дисертаційне дослідження аспіранта Палюха Дмитра Олександровича присвячене вдосконаленню технологічного забезпечення якості виготовлення інтегральних книжково-журнальних обкладинок у структурі післядрукарських процесів поліграфічного виробництва. У роботі обґрунтовано підходи до підвищення точності формування клапанів розгорток обкладинок та стабільності їх склеювання шляхом удосконалення геометрії профільних фальцювальних планок, розроблення методів формування зміцнювального мікрорельєфу поверхневого шару та створення математичних моделей прогнозування їх зносостійкості в умовах експлуатації фальцювально-склеювальних ліній.

У межах дослідження визначено вплив конструктивних параметрів фальцювальних планок на якість загинання та приклеювання клапанів інтегральних обкладинок, обґрунтовано застосування криволінійних профілів (зокрема евольвентних) для забезпечення плавності технологічного процесу фальцювання, розроблено підходи до механічного та лазерного зміцнення робочих поверхонь деталей та встановлено закономірності формування їх мікроструктури, що безпосередньо впливають на стабільність геометрії та довговічність обладнання.

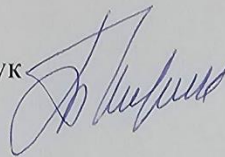
Результати досліджень використано у лекційних, лабораторних та практичних заняттях з дисциплін:

- «Технології поліграфічного виробництва. Післядрукарські процеси»;
- «Технології виготовлення паковань і тари».

Матеріали дисертаційної роботи використовуються у підготовці здобувачів спеціальності 186 «Видавництво та поліграфія» під час вивчення технологій виготовлення книжково-журнальної продукції, проектування фальцювальних механізмів та виконання курсових і кваліфікаційних робіт.

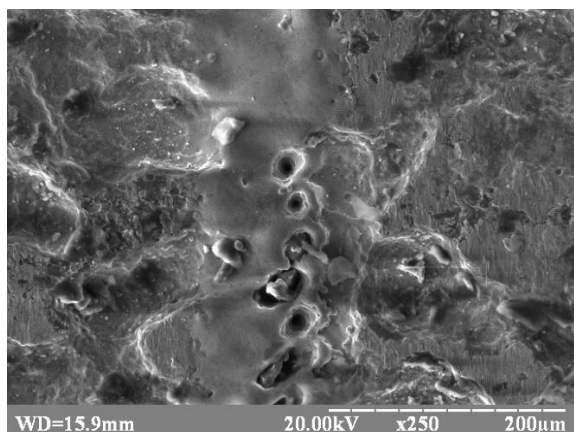
Їх впровадження у навчальний процес сприяє формуванню у здобувачів системного розуміння взаємозв'язку між конструктивними параметрами фальцювальних механізмів, режимами їх роботи та показниками якості й довговічності інтегральних книжково-журнальних обкладинок, зокрема стабільністю геометрії та міцністю клейових з'єднань.

Завідувачка кафедри технології
поліграфічного виробництва
професор, доктор технічних наук

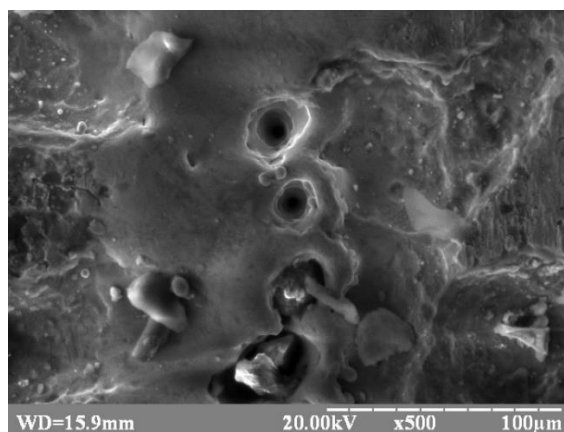


Тетяна КИРИЧОК

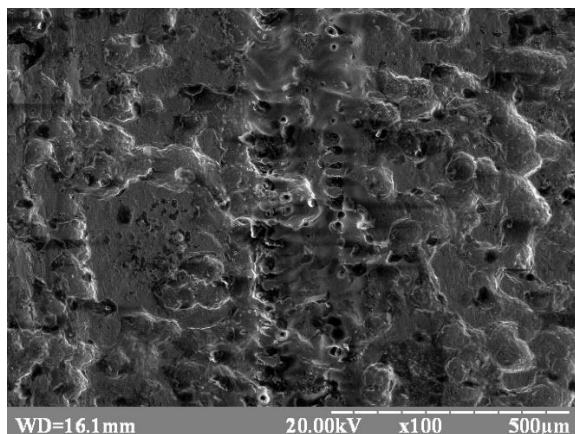
**ДОДАТКИ Б. SEM-мікрофотографії поверхневого шару сталі
08X18H10Б та 05кп**



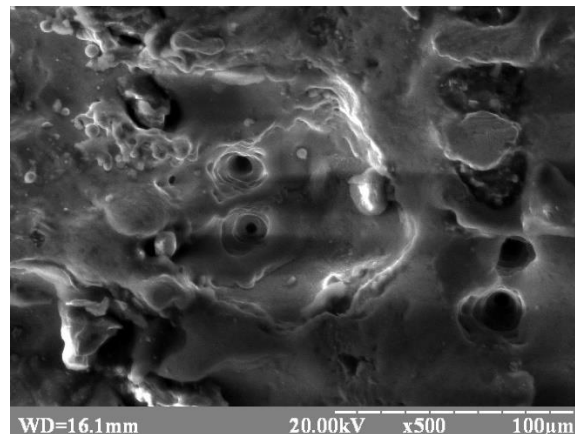
1



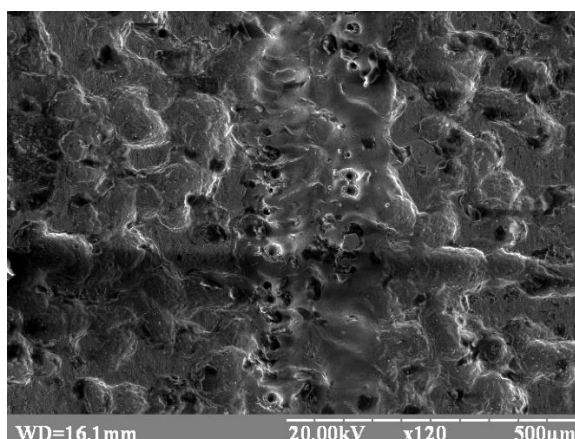
1-1



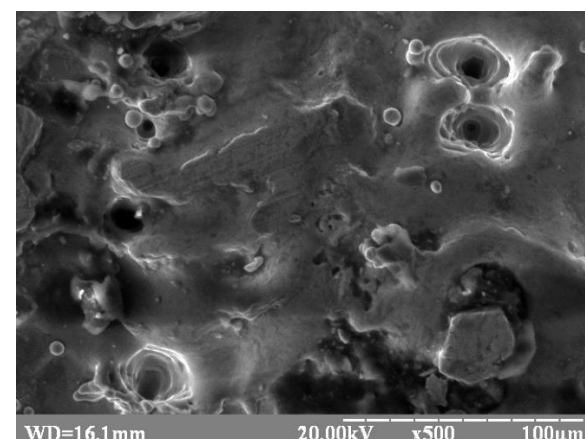
2



2-1

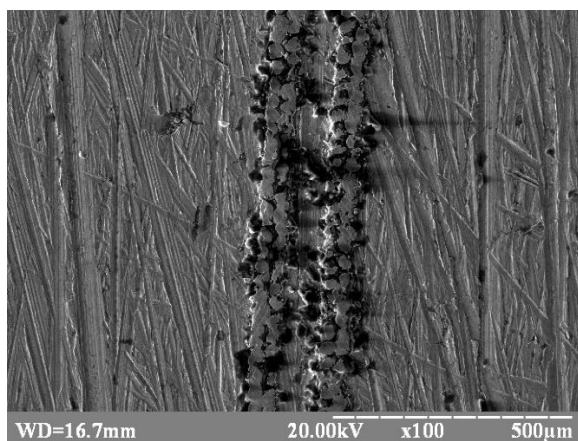


3

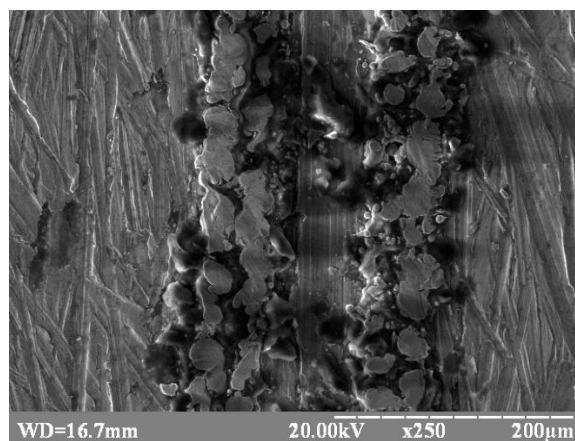


3-1

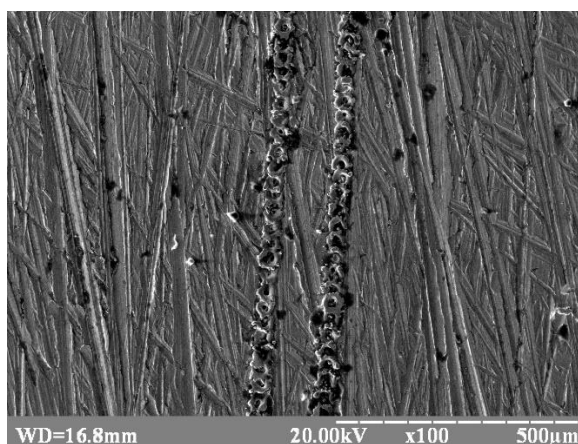
Рис. 1. SEM-мікрофотографії поверхневого шару сталі 08X18H10Б після лазерного формування мікрорельєфу: 1–3 — морфологія обробленої поверхні при різних ділянках; 1-1, 2-1, 3-1 — фрагменти при більшому збільшенні, що ілюструють зони локального термічного впливу, кратери плавлення та зміну топографії поверхні.



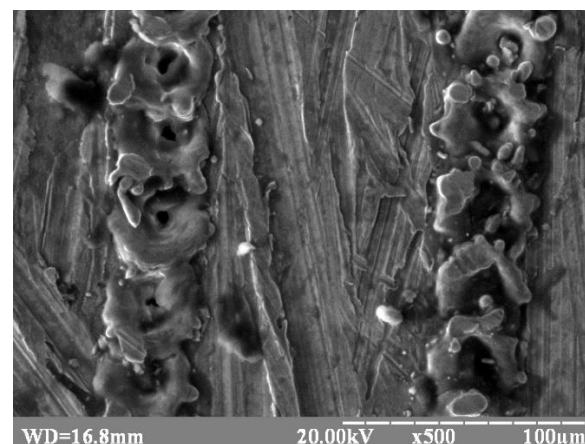
1



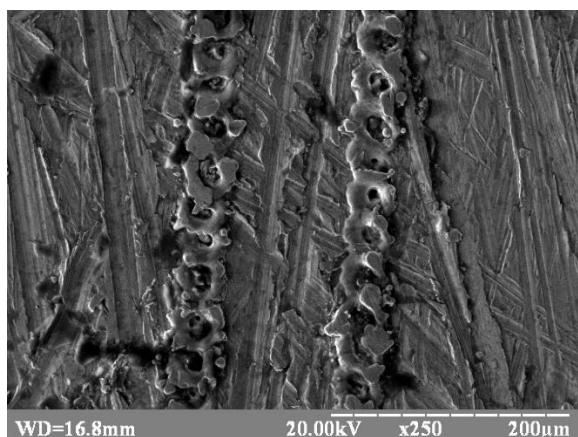
1-1



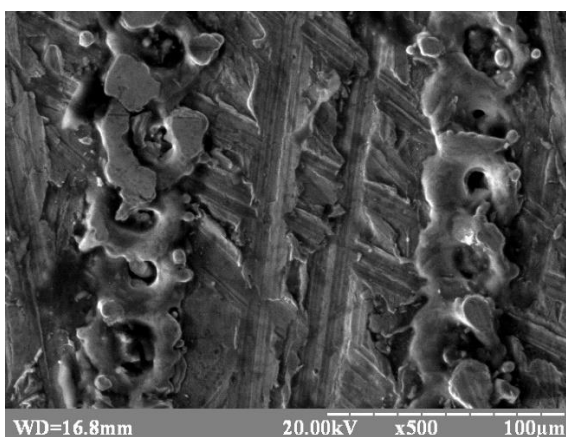
2



2-1



3



3-1

Рис. 2. SEM-мікрофотографії поверхневого шару сталі 05кп після лазерного формування зміцнювального мікрорельєфу: 1–3 — доріжки лазерного впливу, сформовані на робочій поверхні; 1-1, 2-1, 3-1 — локальні області при більшому збільшенні, що ілюструють зони термічного впливу, кратери плавлення, напливи повторно затверділого металу та зміну мікротопографії поверхні.