

УДК 686.1.023.2

DOI: 10.20535/2077-7264.4(86).2024.332807

© В. Б. Струтинський, д-р техн. наук, проф.,
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

**ФІЗИКО-МЕХАНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ
ФАЛЬЦЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ
ПЕНТАГОНАЛЬНИМИ І ГЕКСАГОНАЛЬНИМИ
ІНДЕНТОРАМИ**

Об'єктом дослідження є процес локального зміцнення приповерхневого шару профільних планок фальцювальних систем шляхом індентування інструментами з пентагоною та гексагоною геометрією робочої частини. Побудовано фізико-механічну модель контактної взаємодії багатогранного індентора з пружно-пластичним середовищем, яка враховує особливості осесиметрії, локалізацію напружень і критерії пластичності. Проведено порівняльний аналіз ефективності геометрій інструментів, який показав доцільність вибору форми індентора відповідно до експлуатаційного призначення.

Ключові слова: індентування; геометрія інденторів;
зміцнювальний мікрорельєф; пластична деформація;
контактна взаємодія; фальцювальні елементи.

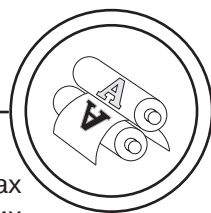
Вступ

Забезпечення зносостійкості та геометричної стабільності елементів фальцювальних систем є важливою умовою надійної роботи поліграфічного обладнання, що функціонує в умовах багаторазових циклічних навантажень. Робочі поверхні фальцювальних планок зазнають тертя та локального тиску під час контакту з папером або поліграфічними півфабрикатами, що зумовлює необхідність їхнього цілеспрямованого зміцнення.

Серед сучасних технологій локального поверхневого зміц-

нення особливу увагу привертають методи поверхневої пластичної деформації (ППД), зокрема методи механічного вдавлювання (індентування), які дозволяють формувати мікрорельєф із заданими характеристиками без теплового впливу та структурної деградації. Одним із ключових чинників, що визначає ефективність ППД, є геометрія інструмента, зокрема форма вдавлювальної головки індентора.

У більшості наявних досліджень застосовуються індентори зі сферичною або циліндричною формою головки. Водночас



у науковій літературі практично не висвітлено впливу багатогранної геометрії інденторів на характер зміцнення, розподіл напружень, симетрію мікрорельєфу та його функціональну стабільність. Гексагональні (шестигранні) та пентагональні (п'ятикутні) індентори є перспективними з огляду на можливість формування структуровано впорядкованого мікрорельєфу з геометрично закріпленими зонами деформації.

Деталі фальцювальних систем, виготовлені зі сталі AISI 304 (American Iron and Steel Institute), характеризуються помірною пластичністю та стабільною аустенітною структурою, що створює підґрунтя для теоретичного аналізу особливостей формування мікрорельєфу в умовах локального індентування. Зокрема, потребує уточнення, які саме геометричні форми головки індентора сприяють ефективнішому зміцненню поверхні з точки зору глибини деформації, симетрії рельєфу та рівномірності розподілу напружень.

Особлива увага приділяється теоретичному визначенню зон пластичної деформації, аналізу контактного тиску, оцінці залишкових напружень та моделюванню напружено-деформованого стану у поверхневому шарі сталі AISI 304 під дією гексагонального і пентагонального інденторів.

Актуальність роботи зумовлена відсутністю у науковому просторі узагальненої моделі, яка б пов'язувала геометрію індентора з параметрами локального зміцнення з урахуванням фізико-механічних властивостей сталі. Побудована модель дозволяє зробити припущення щодо ефективності застосування бага-

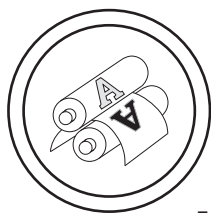
тограних інденторів у процесах ППД без проведення прямих експериментів, що відкриває можливість для подальшої оптимізації інструментів зміцнення.

Постановка проблеми

Підвищення ресурсу та стабільності функціонування фальцювального обладнання в поліграфії потребує удосконалення методів модифікації поверхні робочих елементів без застосування складних чи енергомістких технологій. Сучасні практики поверхневого зміцнення базуються переважно на емпіричних підходах, що обмежує можливості керування параметрами зміцнювального шару у складних умовах експлуатації.

Попри доведену ефективність методу індентування для покращення зносостійкості, відсутні формалізовані підходи, які дозволяють аналітично оцінити вплив геометричних параметрів індентора на напружено-деформований стан матеріалу. Зокрема, багатогранні індентори, як потенційно ефективні для формування регулярного мікрорельєфу, не мають належного теоретичного обґрунтування в контексті зміцнення деталей із нержавіючої сталі типу AISI 304.

Наявні дослідження переважно обмежуються сферичними або конічними формами інденторів, не охоплюючи симетрію впливу, зони локалізації деформації та стійкість рельєфу до повторних механічних навантажень. Такий підхід унеможливорює оптимізацію інструменту для тривалої експлуатації за умов високочастотного циклічного тертя, характерного для фальцювальних процесів.



Таким чином, наукова проблема полягає в необхідності створення фізико-механічної аналітичної моделі, яка б описувала закономірності формування зміцнювального мікрорельєфу на поверхні фальцювальних планок під дією пентагональних та гексагональних інденторів. Така модель повинна враховувати особливості контактної взаємодії, розподіл напружень, глибину пластичної деформації та симетрію зони вдавлювання. Її розробка дозволить сформувати нове теоретичне підґрунтя для інженерної оптимізації інструментів поверхневого зміцнення з урахуванням специфіки експлуатації в поліграфічному виробництві.

Аналіз попередніх досліджень

Проблематика підвищення зносостійкості та довговічності деталей фальцювальних систем поліграфічного обладнання актуалізує необхідність цілеспрямованого впливу на мікроструктуру поверхневого шару. Одним із перспективних напрямів є локальне зміцнення методом поверхневої пластичної деформації, що дозволяє формувати функціонально орієнтований мікрорельєф без теплового впливу.

У сучасній науковій літературі представлено чимало досліджень, присвячених застосуванню методів індентування для зміцнення металевих поверхонь, однак більшість з них зосереджені на сферичних або циліндричних формах інструментів. Геометрія головки індентора як керований параметр процесу формування зміцнювального рельєфу залишається малодослідженим аспектом,

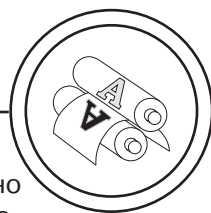
зокрема у контексті застосування інденторів із багатогранною формою.

У публікації [1] досліджено вплив зміцнювального мікрорельєфу на ефективність фальцювання інтегральних обкладинок. Автори довели кореляцію між геометрією рельєфу та ергономічністю згину. Однак не розглянуто, яким чином форма інструмента (індентора) впливає на характер цього рельєфу. Причиною є зосередженість дослідження на результатах функціонування системи, а не на механізмі формування рельєфу.

У роботі [2] викладено загальні підходи до відновлення деталей шляхом пластичної деформації. Проте відсутній акцент на формоутворення зміцнювального мікрорельєфу як на цілеспрямовано керованому процесі, зокрема з використанням інструментів різної геометрії. Це пояснюється тим, що робота має переважно класифікаційний характер і не орієнтована на точкові технології впливу.

У праці [3] автори систематизували переваги поверхневої пластичної деформації для підвищення міцності деталей. Водночас залишилося не дослідженим питання впливу специфіки форми інденторів на результати зміцнення. Причина полягає в загальному характері дослідження, де структурна деталізація була поза межами фокуса аналізу.

У дослідженні (2020) [4] проаналізовано вплив інтенсивної пластичної деформації на властивості сталі AISI 304. Попри позитивні результати щодо покращення твердості, автори не звернули уваги на можливість кон-



тролю рельєфу шляхом зміни геометрії інструмента. Ймовірно, це пов'язано з матеріалознавчим спрямуванням роботи без акценту на технологічні аспекти модифікації поверхні.

У публікації [5] наведено порівняльний аналіз моделей, що описують ефект розміру при індентуванні. Проте ці моделі не були адаптовані до умов локального зміцнення із застосуванням інденторів різної геометрії. Причина полягає у теоретичному спрямуванні дослідження, яке не передбачало інженерно-прикладної реалізації.

У статті [6] автори зосередилися на аналізі пластичної деформації шорстких поверхонь металів під навантаженням. Однак геометрія інструмента не розглядається як контрольований змінний чинник. Така обмеженість пояснюється зосередженістю на механізмах контактного тертя без структурного втручання у форму індентора.

В оглядовій роботі [7] здійснено систематизацію методів інтенсивної пластичної деформації поверхонь для сталей. Разом із тим, у роботі не розглянуто вплив геометрії інструментів (зокрема багатограних форм) на керування структурою мікрорельєфу. Ймовірно, це обумовлено характером джерела як тематичного огляду без емпіричної частини.

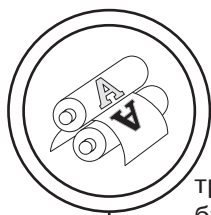
У дослідженні [8] автори розглянули мікроструктуру сталевого композиту та його поведінку при наноіндентуванні. Проте геометрія індентора була постійною і не виступала предметом варіації. Очевидним обмеженням є фокус на матеріалознавчих характеристиках, а не на параметрах інструментального впливу.

У статті [9] проаналізовано процес ущільнення нанопористих металів при індентуванні. Попри важливість висвітлених механізмів, дослідження не охоплює впливу форми індентора на характер деформації. Причина — орієнтація на мікромасштабні системи, які є відмінними від макроструктур сталевих фальцювальних елементів.

У публікації [10] акцент зроблено на дослідженні неоднорідності мікрорегіональних властивостей сталі за допомогою швидкого наноіндентування. Водночас залишилося поза увагою питання геометрії інструмента, оскільки головна мета полягала в картографуванні властивостей, а не у вивченні технологічних чинників зміцнення.

У дослідженні [11] автори розглянули механізм мартенситного перетворення, індукованого індентуванням у сплавах з ефектом пам'яті форми, з використанням фазово-польового моделювання. Дослідження дає глибоке теоретичне уявлення про поведінку матеріалів із трансформційною пластичністю, однак не містить аналізу інструментальних чинників, таких як форма чи геометрія інденторів. Причиною є спрямованість роботи на фундаментальне вивчення фазових переходів у специфічних сплавах, а не на практичні аспекти зміцнення сталей для поліграфічних систем.

У публікації [12] наведено експериментальне дослідження мікроструктури та механічних властивостей стрічок Ni-(Fe, Co)-Mn-(Al, In), отриманих методом швидкого охолодження, із використанням наноіндентування та



триточкових згинальних випробувань. Попри високу точність вимірювання, геометрія інденторів залишилася фіксованою і не аналізувалась як змінна дослідження. Ймовірна причина — зосередженість авторів на вивченні сплавів з високою чутливістю до термічної історії, а не на параметрах інструментального впливу.

На основі проведеного аналізу [1–12] виявлено, що більшість доступних досліджень зосереджені на загальних закономірностях поверхневої пластичної деформації, оцінці мікротвердості або аналізі матеріалів. Однак не вирішеним залишається питання системного дослідження впливу геометрії інденторів з багатогранною формою (зокрема пентагональною та гексагональною) на процес формування зміцнювального мікрорельєфу деталей фальцювальних систем, що зазнають циклічного навантаження.

Невирішеність цієї проблеми зумовлена:

- орієнтацією більшості робіт на сферичні або циліндричні форми інденторів;
- відсутністю стандартизованих методик для порівняльного аналізу мікрорельєфів різної симетрії;
- браком прикладних досліджень, спрямованих на використання багатограних форм інструментів у промислових умовах поліграфічного машинобудування.

Тому доцільним є дослідження, присвячене створенню фізико-механічної моделі локального зміцнення поверхневого шару деталей фальцювальних систем із застосуванням полігональних

(пентагональних і гексагональних) інденторів. Це дослідження дозволить оцінити вплив багатогранної геометрії робочої частини інструмента на розподіл залишкових напружень, глибину пластичної деформації та параметри мікрорельєфу. Результати такого дослідження створять наукове підґрунтя для подальшої розробки технологій керованого індентування в поліграфічному машинобудуванні з метою підвищення зносостійкості та довговічності фальцювального обладнання.

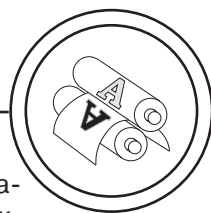
Мета роботи

Теоретичне обґрунтування та фізико-механічне моделювання процесу локального поверхневого зміцнення сталевих елементів фальцювальних систем методом індентування з використанням інструментів із пентагональною та гексагональною геометрією головки. При цьому враховується розподіл контактних напружень, глибина пластичної деформації та параметри мікрорельєфу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі науково-технічні завдання:

1. Сформулювати теоретичні засади фізико-механічного моделювання процесу індентування матеріалів з урахуванням впливу геометричних параметрів індентора на характер формування зміцнювального мікрорельєфу.

2. Розробити фізико-механічну модель локального зміцнення поверхні сталі AISI 304, яка описує взаємозв'язок між формою інструмента, механічними характеристиками матеріалу та параметрами контактної взаємодії.



3. Здійснити чисельне моделювання процесів пластичної деформації при вдавлюванні інденторів пентагональної та гексагональної форми та визначити закономірності формування зон залишкових напружень і рельєфної структури.

4. Провести порівняльний аналіз ефективності інденторів різної геометрії за критеріями глибини зміцнення, симетрії сформованого мікропрофілю та стабільності зміцнювального ефекту з метою визначення оптимальної форми інструмента для забезпечення зносостійкості фальцювальних елементів.

Результати проведених досліджень

Процес індентування матеріалів, спрямований на локальне поверхнєве зміцнення, базується на закономірностях пружно-пластичного деформування у зоні контакту між індентором та оброблюваною поверхнею. Для опису цього процесу використовуються фізико-механічні моделі, що враховують взаємодію жорсткого інструмента з більш пластичним середовищем за умов нерівномірного розподілу напружень, наявності залишкових деформацій та градієнтів твердості в підповерхневих шарах.

У загальному випадку контактне навантаження призводить до утворення осередку пластичної деформації під поверхнею, розміри та форма якого визначаються не лише механічними властивостями матеріалу, а й геометрією індентора — зокрема формою його робочої поверхні, кутами граней, радіусами заокруглення та симетрією контуру. Залежно

від кількості вершин і типу багатокутної проєкції (наприклад, гексагональної або пентагональної), утворюються різні схеми локалізації напружень і зони накопичення деформацій, що впливають на мікрорельєф та його симетрію.

У рамках фізико-механічного моделювання, контактна взаємодія описується рівняннями рівноваги в умовах плоско-деформованого або осесиметричного стану, з використанням критеріїв пластичності (наприклад, Губера–Мізеса) для визначення граничної деформації. Особливе значення має аналітичний або чисельний опис форми зони зміцнення, яка формується внаслідок інтенсивної локальної пластичної плинності матеріалу.

Врахування геометричних параметрів індентора у моделі дозволяє:

- прогнозувати глибину зміцнення залежно від кута граней;
- оцінити розподіл залишкових напружень у поверхневому шарі;
- визначити симетрію та періодичність мікрорельєфу;
- встановити взаємозв'язок між формою інденторної головки та характеристиками зміцненого шару (твердість, градієнт твердості, шорсткість).

Отже, включення геометричних чинників у фізико-механічні моделі індентування є необхідною умовою для точного відтворення процесу формування зміцнювального мікрорельєфу, з подальшою оптимізацією параметрів інденторів для різних типів технологічних задач.

З метою ілюстрації принципу дії механізму індентування та просторової взаємодії індентора з

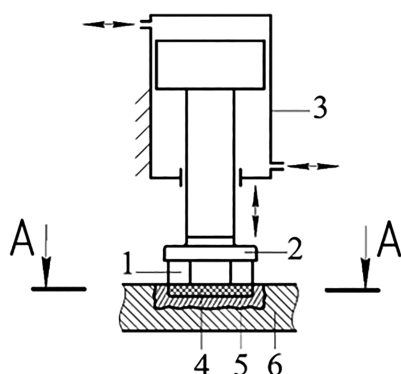
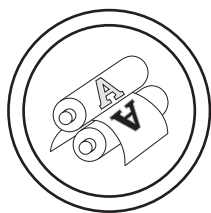


Рис. 1. Конструктивна схема пристрою для формування полігонального мікрорельєфу на фальцювальних планках методом локального індуентування: 1 — індентор із полігональною головою (гексагональною або пентагональною); 2 — тримач індентора; 3 — гідравлічний механізм індуентування; 4 — модельний переріз робочої частини індентора; 5 — умовне зображення локалізованої зони пластичної деформації; 6 — переріз фальцювальної пластини

поверхню фальцювальної пластини на рис. 1–3 подано узагальнену схему пристрою для фор-

мування полігонального мікрорельєфу та характерні варіанти перерізу зони пластичної деформації залежно від геометрії індуенторної головки.

На рис. 1 наведено загальний вигляд пристрою для формування полігонального мікрорельєфу методом індуентування, виконаний у вигляді функціональної схеми з позначенням основних елементів конструкції, що дозволяє реалізувати кероване локальне навантаження на поверхню фальцювальної пластини. Робочим елементом системи є індуентор (1), який має полігональну головку, конфігурація якої може бути гексагональною або пентагональною залежно від поставленого технологічного завдання. Індуентор жорстко закріплений у тримачі (2), що забезпечує точне передавання навантаження без кутових або радіальних зсувів.

Осьове навантаження на індуентор створюється за допомогою гідравлічного приводу (3), який забезпечує формування

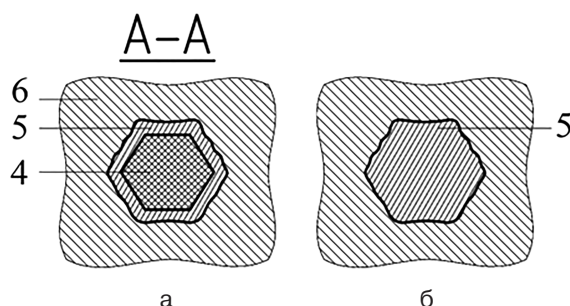
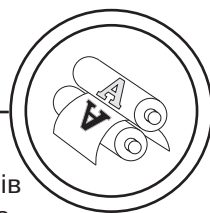


Рис. 2. Конструктивна модель поперечного перерізу фальцювальної пластини під час вдавлення гексагонального індуентора: а — умовна схема перерізу пластини, зони деформації та індуентора; б — фрагментована модель перерізу пластини із зоною деформації; 4 — модельне зображення гексагонального індуентора у перерізі; 5 — умовне зображення локалізованої зони пластичної деформації; 6 — контур фальцювальної пластини у перерізі



стабільної та керованої сили вдавлення протягом усього циклу контакту. У нижній частині схеми позначено переріз інденторної головки (4), яка взаємодіє з поверхнею фальцювальної пластини, викликаючи локальні пластичні деформації в її приповерхневому шарі (5). Матеріал пластини, що підлягає зміцненню, зображено у вигляді перерізу (6), що дозволяє оцінити характер і глибини взаємодії в зоні контакту.

На рис. 2, 3 представлено чотири варіанти поперечних перерізів А–А, що ілюструють просторову конфігурацію зони пластичної деформації, сформованої в результаті індентування інструментами з різною геометрією робочої частини. Зокрема, на рис. 2 наведено типові морфологічні характеристики мікрорельєфу, отриманого за допомогою гексагонального індентора, тоді як рис. 3 відображає відповідні структурні особливості для пентагонального індентора.

Кожен із наведених перерізів ілюструє просторову конфігурацію основних елементів системи індентування: центральна штрихована багатокутна область відповідає перерізу індентора з гексагональною (або пентагональною) головкою; навколишня зона з меншою щільністю штрихування відображає область локалізованої пластичної деформації; зовнішній контур позначає межі фальцювальної пластини.

Таке графічне представлення дає можливість візуально порівняти вплив форми інденторної головки на геометрію зміцненої зони та симетрію сформованого мікрорельєфу.

Для кількісної оцінки впливу форми індентора на характер розподілу напружень і деформацій у зоні контакту доцільно використати фізико-механічну модель пружно-пластичної взаємодії. Такий підхід дозволяє не лише відтворити основні закономірності формування зміцнювального

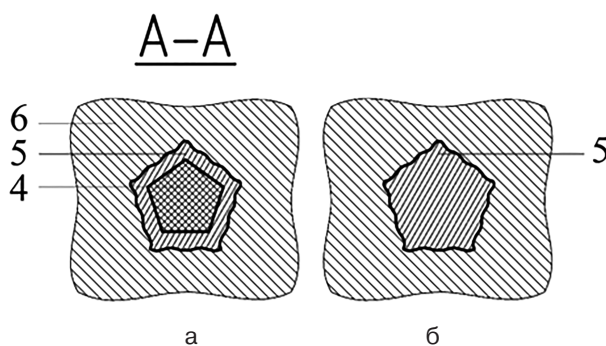
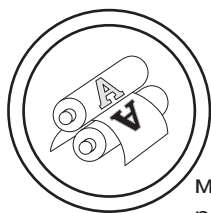


Рис. 3. Конструктивна модель поперечного перерізу фальцювальної пластини під час вдавлення пентагонального індентора: а — умовна схема перерізу пластини, зони деформації та індентора; б — фрагментована модель перерізу пластини із зоною деформації; 4 — модельне зображення пентагонального індентора у перерізі; 5 — умовне представлення локалізованої зони пластичної деформації; 6 — контур фальцювальної пластини у перерізі



мікрорельєфу, а й визначити параметри зони пластичної плинності залежно від навантаження, геометрії інструмента та механічних властивостей матеріалу.

З огляду на особливості геометрії взаємодії та співвідношення між товщиною пластини й розміром зони деформації, доцільно розглядати процес у припущенні площинно-деформованого стану, що значно спрощує математичний опис і водночас відповідно описує характер напруженого стану в приповерхневих шарах.

У площинно-деформованому стані (plane strain) рівняння рівноваги без урахування тіла сили мають вигляд:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0.\end{aligned}\quad (1)$$

Для аустенітної сталі AISI 304 застосовано критерій Губера–Мізеса [13], який належить до групи енергетичних критеріїв плинності та ґрунтується на понятті еквівалентної напруги. Цей критерій використовується для визначення умов переходу матеріалу з пружного в пластичний стан при просторовому напруженому стані. Матеріал починає переходити у пластичний стан, коли його еквівалентна (міцнісна) напруга досягає границі плинності в одноосному розтягу.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}, \quad (2)$$

де σ_{eq} — еквівалентна (інтенсивність) напруга, яка використовується для оцінки початку пластичної

деформації; σ_x — нормальна напруга у напрямі осі x ; σ_y — нормальна напруга у напрямі осі y ; τ_{xy} — дотична (зсувна) напруга у площині xy .

Застосування критерію Мізеса дозволяє:

- визначити глибину зони пластичної деформації в матеріалі;
- побудувати моделі розподілу твердості та деформацій у приповерхневому шарі;

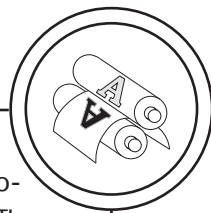
- обґрунтувати доцільну геометрію інденторів для забезпечення контрольованого формування зміцнювального мікрорельєфу.

При глибокому вдавлюванні індентора контактна зона переходить у пластичний режим, і середній контактний тиск у зоні вдавлювання визначається як:

$$p_m = C_p \cdot \sigma_y, \quad (3)$$

де σ_y — границя плинності матеріалу; C_p — емпіричний коефіцієнт, що залежить від геометрії індентора та враховує ефективну концентрацію напружень у зоні контакту; $C_p \approx 2,8$ — для полігонального індентора; $C_p \approx 2,6 \dots 3,0$ — для гексагонального індентора, який має високу симетрію і помірну концентрацію напружень через рівномірно розподілені кути; $C_p \approx 3,0 \dots 3,4$ — для пентагонального індентора. Через меншу кількість сторін порівняно з гексагональним (гостріші кути: 108° проти 120°), формується вища локальна концентрація напружень у вершинах. Це спричиняє глибше проникнення індентора за однакового навантаження та інтенсивнішу пластичну деформацію поблизу кутових зон контакту.

Глибина проникнення індентора (апроксимація через функцію занурення):



$$h = \frac{F}{A \cdot p_m}, \quad (4)$$

де F — навантаження; A — площа проекції гексагонального індентора:

$$A = \frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot a^2, \quad (5)$$

A — площа проекції пентагонального індентора

$$A = \frac{5}{4} \cdot s^2 \cdot \cot\left(\frac{\pi}{5}\right). \quad (6)$$

Для пентагональних і гексагональних інденторів, які мають локалізовані кутові вершини та формують геометрично структуровані мікрорельєфи, застосовано підхід радикального занурення, що дає змогу описати поведінку матеріалу в умовах значного локального пластичного деформування.

За теорією радикального занурення, повну пластичну деформацію $\varepsilon_p(r)$ у зоні контакту від центра визначають як функцію радіальної координати r , яка залежить від глибини проникнення індентора, розподілу контактного тиску та геометрії його робочої частини.

$$\begin{aligned} \varepsilon_p(r) &= \int_0^r \frac{\partial \varepsilon_p}{\partial r} dr = \\ &= \int_0^r \frac{1}{E} \left(\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} \right) dr. \end{aligned} \quad (7)$$

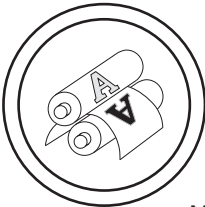
Ця формула виражає накопичену пластичну деформацію у точці r , яка залежить від локальних напружень (радіальних і тангенціальних), механічних власти-

востей матеріалу (через E), геометрії поля напружень (залежить від індентору та умов контакту). З метою забезпечення однозначного тлумачення параметрів, що входять до виразу для $\varepsilon_p(r)$, у табл. 1 подано позначення фізичних величин та констант, використаних у наведеній залежності.

У зоні повної пластичності, де $\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_y$, спостерігається максимально інтенсивне накопичення деформації, яка локалізується в підповерхневому шарі товщиною приблизно 0,2–0,3 від діаметра індентора, що відповідає області найбільшого впливу контактного тиску.

Оскільки процес вдавлювання індентора (пентагонального або гексагонального) у поверхню пластини зі сталі AISI 304, за умов поперечного перерізу, супроводжується формуванням профілю з близькою до радіальної симетрією, його доцільно апроксимувати як осесиметричну задачу. Така постановка дозволяє використати аналітичні методи теорії пружності та пластичності для опису розподілу контактного напруження, що виникає під час локальної дії інструмента.

Зокрема, це забезпечує можливість визначення глибини зони пластичної деформації навколо індентора та моделювання взаємозв'язку між формою головки інструмента і характером навантаження на матеріал. Як наслідок, стає можливим теоретичне оцінювання параметрів зміцнення мікрорельєфу, включаючи амплітуду контактного тиску, залишкові напруження, а також вплив геометрії індентора на глибину пластичних змін у металі.



Аналітичне подання осесиметричної контактної взаємодії індентора з пружнопластичним середовищем представлено у такій формі:

$$\frac{d^2h}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dh}{dr} = -\frac{p(r)}{E^*}, \tag{8}$$

де $h(r)$ — вертикальна деформація (заглиблення матеріалу); $p(r)$ — розподіл контактного тиску; $E^* = \frac{E}{1-\nu^2}$ — приведений модуль Юнга.

Розв’язуючи рівняння, отримуємо профіль вдавнення, який визначає, наскільки глибоко проникає індентор і, яка форма зони деформації:

$$z(r) = h_0 \cdot \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) \tag{9}$$

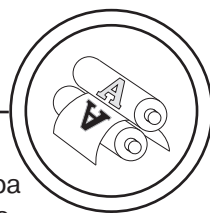
— це типовий півеліпсоїдальний контур зони пластичної деформації, який використовується для моделювання процесу вдавлювання інденторів.

Через концентрацію тиску в кутах полігонального індентора (особливо пентагонального), розподіл $p(r)$ не є рівномірним.

Під час локального вдавлювання індентора в поверхню сталі AISI 304 у навколишньому об’ємі формується градієнт зміцнення, який проявляється у вигляді варіації твердості з глибиною. Найбільше значення твердості спостерігається поблизу поверхні контакту, тоді як зі зростанням глибини інтенсивність наклепу

Таблиця 1
Позначення складових у формулі для $\varepsilon_p(r)$

Позначення	Одиниці вимірювання	Пояснення
$\varepsilon_p(r)$	[–]	Пластична деформація на відстані r від центра індентації
$\partial\varepsilon_p/\partial r$	[мм ⁻¹]	Градієнт пластичної деформації за радіусом
r	[мм]	Радіальна відстань від центра зони вдавнення
E	[МПа]	Модуль Юнга матеріалу (для AISI 304 ≈ 193000 МПа)
σ_r	[МПа]	Радіальна компонента напруження
σ_θ	[МПа]	Тангенціальна (обвідна) компонента напруження
$\partial\sigma_r/\partial r$	[МПа/мм]	Градієнт радіального напруження
$(\sigma_r - \sigma_\theta)/r$	[МПа/мм]	Рівноважна складова для кругової симетрії
$1/E \cdot (...)$	[1/МПа]	Інверсія модуля пружності, що масштабує локальні деформації



зменшується, формуючи зону перехідної пластичної деформації. Такий градієнт забезпечує підвищену зносостійкість без втрати пластичності в підповерхневому шарі.

Твердість у зоні локального зміцнення зростає пропорційно до величини пластичної деформації, що формалізується такою залежністю:

$$H(r) = H_0 + \alpha \cdot \varepsilon_p(r), \quad (10)$$

де H_0 — початкова мікротвердість матеріалу (до деформації); α — коефіцієнт зміцнення (для AISI 304 $\approx 1,8 \dots 2,2$ ГПа); $\varepsilon_p(r)$ — пластична деформація в точці r .

Для кількісної перевірки цієї залежності та виявлення закономірностей зміни твердості й пластичної деформації у приповерхневих шарах, проведено серію експериментальних досліджень із використанням контрольованого процесу ідентування.

Експериментальне дослідження проводилось з метою встановлення закономірностей розподілу повної пластичної деформації $\varepsilon_p(r)$ в приповерхневому шарі фальцювальної пластини після одноразового вдавнення індентора з полігональною головою.

Для проведення дослідження виготовлено зразки у формі прямокутних пластин із конструкційної нержавіючої сталі AISI 304, яка широко застосовується у виготовленні профільних планок для фальцювальних систем завдяки своїй стабільній аустенітній структурі, високій корозійній стійкості та помірній пластичності [4]. Цей матеріал демонструє стійку деформаційну поведінку під дією концентрованих наван-

тажень, а його мікроструктура сприяє формуванню стабільного зміцнювального рельєфу, що забезпечує ефективність локального зміцнення (табл. 2).

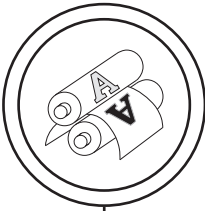
Таблиця 2
Основні характеристики матеріалу

Параметр	Значення
Марка сталі	AISI 304
Межа міцності	520–750 МПа
Межа плинності	210–250 МПа
Відносне подовження	40–50 %
Твердість	$\approx$ HV 180

Зразки мали габаритні розміри $60 \times 20 \times 3$ мм і попередньо піддані механічному поліруванню до початкової шорсткості $Ra \leq 0,1$ мкм для забезпечення однорідності умов ідентування.

Процес зміцнення поверхні здійснювався методом локального ідентування, при якому у задані точки поверхні вдавлювались інструменти двох типів: гексагональні індентори з правильною шестигранною формою головки, пентагональні індентори з правильною п'ятикутною формою (табл. 3).

Індентори виготовлено з твердого сплаву ВК8, їхні геометричні параметри (висота, кут, радіус кромки) підібрано таким чином, щоб забезпечити еквівалентну площу вдавлювання для обох типів (табл. 3). Вдавнення виконувалося з постійним навантаженням 500 Н, із витримкою 5 с у кожній точці.



Таблиця 3

Геометричні параметри інденторів

Параметр	Гексагональний індентор	Пентагональний індентор
Форма	Шестигранник	П'ятикутник
Площа проекції, мм ²	4,80	4,75
Радіус заокруглення ребер, мм	0,2	0,2
Висота інденторної частини, мм	3	3

З отриманих значень мікротвердості побудовано профіль $H_V(r)$, який далі перетворено у розподіл еквівалентної пластичної деформації $\varepsilon_p(r)$. Для цього застосовано узагальнену емпіричну залежність Tabor'a [14] у вигляді:

$$\sigma \approx \frac{H_V}{3}, \quad \varepsilon_p \approx \frac{\sigma}{E} \cdot \left(\frac{1}{1-\nu^2} \right), \quad (11)$$

де E — модуль Юнга (≈ 200 ГПа для AISI 304); ν — коефіцієнт Пуассона ($\approx 0,3$).

Таке перетворення дозволяє експериментально оцінити розподіл пластичної деформації без прямого вимірювання напружень і деформацій, що особливо цін-

но при вивченні локального зміцнення, залишкових напружень і точності моделювання контактної взаємодії.

Для спрощення обчислень у межах області, де деформація перевищувала пружну межу, використано апроксимуючу експоненційну функцію:

$$\varepsilon_p(r) = \varepsilon_{po} \cdot \exp(-\alpha \cdot r), \quad (12)$$

де ε_{po} — максимальна пластична деформація в центрі контакту; α — емпіричний коефіцієнт спадання, визначений шляхом апроксимації експериментальних даних методом найменших квадратів.

На основі отриманих значень сформовано графіки (рис. 4, 5)

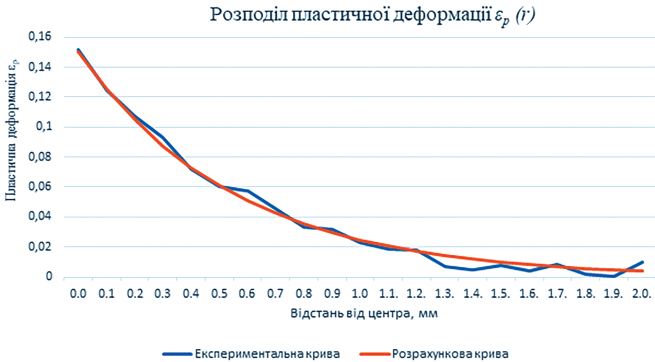


Рис. 4. Графіки розподілу еквівалентної пластичної деформації $\varepsilon_p(r)$ (безрозмірна величина) у зоні контакту індентора з гексагонального голівкою з поверхнею фальцювальної пластини зі сталі AISI 304

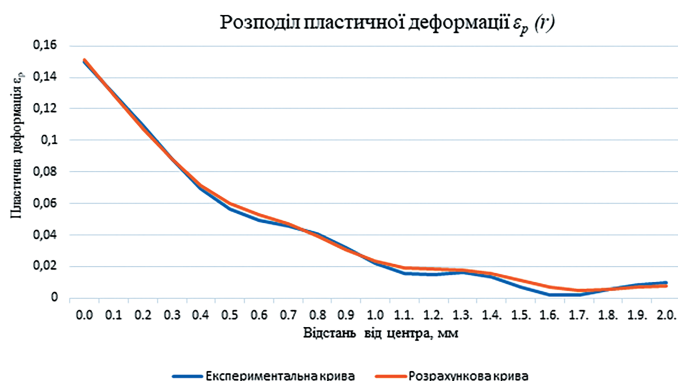
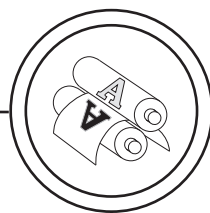


Рис. 5. Графіки розподілу еквівалентної пластичної деформації $\varepsilon_p(r)$ (безрозмірна величина) у зоні контакту індентора з пентагональною головкою з поверхнею фальцювальної пластини зі сталі AISI 304

розподілу еквівалентної пластичної деформації $\varepsilon_p(r)$ в зоні контакту індентора з гексагональною та пентагональною головками із поверхнею фальцювальної пластини зі сталі AISI 304. Ці графіки дозволяють візуалізувати закономірності зміцнення залежно від геометричних параметрів інструмента.

Максимальна деформація на графіку (рис. 4) спостерігається в центрі контакту ($r = 0$), де значення еквівалентної пластичної деформації сягає $\varepsilon_p \approx 0,15$, що є типовим для умов локального втискування багатогранного індентора. Із збільшенням відстані r від центра зона пластичної деформації поширюється радіально, при цьому значення $\varepsilon_p(r)$ поступово зменшується і наближається до нуля, що відповідає межі зони впливу індентора. Така поведінка відображає концентрований характер напружено-деформованого стану в приповерхневому шарі та свідчить про ефективну локалізацію зміцнення.

Аналіз графіка (рис. 5) розподілу еквівалентної пластичної

деформації $\varepsilon_p(r)$ засвідчив, що найбільші значення зосереджені в межах радіуса до 0,6 мм, що відповідає зоні повної пластичності. Далі спостерігається поступове спадання ε_p до значень нижче 0,02 у діапазоні $r = 1,5-2,0$ мм, що відповідає периферії контактної взаємодії. Глибина розподілу підтверджує ефективність пентагонального індентора у створенні концентрованого зміцнення.

На рис. 6, 7 представлено розподіл мікротвердості $H(r)$ у зоні дії індентора з гексагональною та пентагональною головками, визначений шляхом експериментального вимірювання твердості та розрахунковим шляхом на основі фізико-механічного моделювання.

Максимальне значення мікротвердості спостерігається в центральній точці ($r = 0$) графіка 6 і поступово зменшується у напрямі до периферії. Це узгоджується з фізичною природою процесу — найбільше зміцнення відбувається у зоні найбільшого контактного тиску.

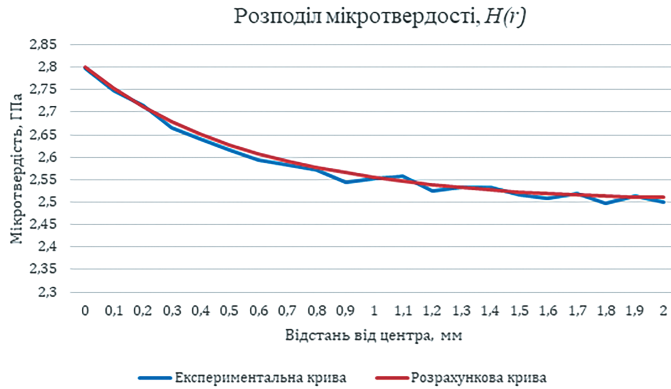


Рис. 6. Графіки розподілу мікротвердості $H(r)$, ГПа, у зоні контакту індентора з гексагональною головкою з поверхнею фальцювальної пластини зі сталі AISI 304

Характерна особливість графіка (рис. 7) полягає в наявності локальних флуктуацій у зоні ближче до центра, що відповідає концентрованим деформаційним впливам поблизу вершин п'ятикутника.

Графіки розподілу пластичної деформації $\varepsilon_p(r)$ та мікротвердості $H(r)$ демонструють подібний характер, що зумовлено наявністю лінійного функціонального зв'язку між цими величинами.

На графіках (рис. 8, 9) представлено залежність глибини

вдавлення $h(F)$ від прикладеного навантаження F під час інденування гексагональним та пентагональним інденторами поверхні фальцювальної пластини зі сталі AISI 304.

Графіки 8, 9 демонструють нелінійну, але наближену до лінійної залежність між силою навантаження і глибиною проникнення інденторної головки в матеріал. Зі збільшенням навантаження, відповідно зростає глибина пластичної деформації h .

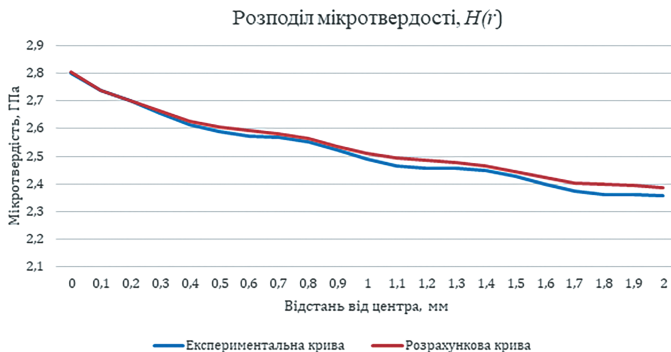


Рис. 7. Графіки розподілу мікротвердості $H(r)$, ГПа, у зоні контакту індентора з пентагональною головкою з поверхнею фальцювальної пластини зі сталі AISI 304

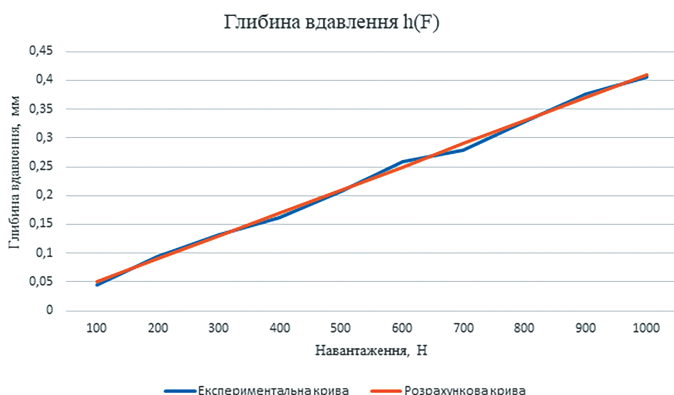
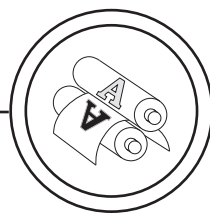


Рис. 8. Графіки залежності глибини вдавнення $h(F)$ від навантаження F для індентора з гексагональною головкою при контакті з фальцювальною пластиною зі сталі AISI 304

Для поглибленого кількісного аналізу впливу геометричної форми індентора на особливості пластичної деформації при локальному навантаженні запропоновано порівняльну математичну модель взаємодії гексагонального та пентагонального інденторів із приповерхневим шаром фальцювальних пластин зі сталі AISI 304.

Контактна взаємодія розглядалася з урахуванням середньо-

го індентувального тиску, визначеного за формулою (3). Залежно від форми індентора, розрахунок цього тиску уточнюється через відповідні геометричні співвідношення:

— гексагональний індентор:

$$\begin{aligned} C_p^{(hex)} &\approx 2,8 \Rightarrow \\ \Rightarrow p_m^{(hex)} &\approx 672 \text{ МПа}; \end{aligned} \quad (13)$$

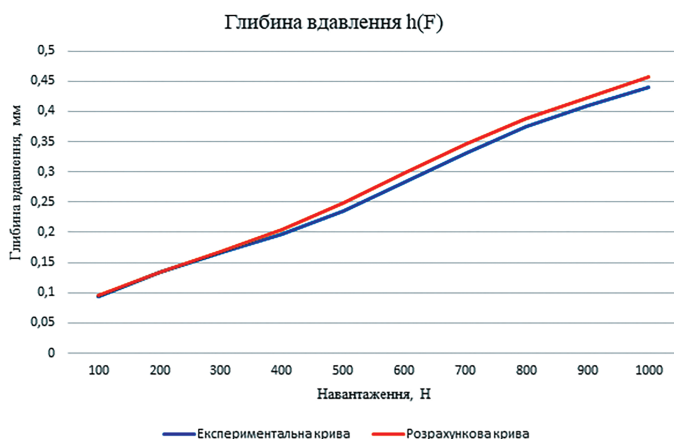
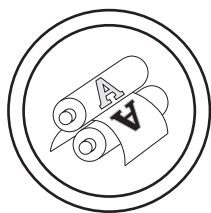


Рис. 9. Графіки залежності глибини вдавнення $h(F)$ від навантаження F для індентора з пентагональною головкою при контакті з фальцювальною пластиною зі сталі AISI 304



— пентагональний індентор:

$$\begin{aligned} C_p^{(\text{pent})} &\approx 3,2 \Rightarrow \\ \Rightarrow p_m^{(\text{pent})} &\approx 768 \text{ МПа.} \end{aligned} \quad (14)$$

Аналіз отриманих виразів показує, що пентагональна конфігурація головки індентора спричиняє вищу локалізацію навантаження, що, своєю чергою, підвищує концентрацію пластичних деформацій у матеріалі.

Для відображення просторового розподілу пластичної деформації $\varepsilon_p(r, \theta)$ побудовано функціональні моделі, які враховують залежність як від радіальної, так і від кутової координат:

— у випадку гексагонального індентора:

$$\begin{aligned} \varepsilon_p^{(\text{hex})}(r) &= \\ &= \varepsilon_0 \cdot (1 - e^{-kr}). \end{aligned} \quad (15)$$

Деформаційне поле є симетричним і рівномірним по всьому колу контакту без кутової модуляції.

— у випадку пентагонального індентора:

$$\begin{aligned} \varepsilon_p^{(\text{pent})}(r, \theta) &= \varepsilon_0 \cdot (1 - e^{-kr}) \cdot \\ &\cdot (1 + \delta \cdot \cos(5\theta)), \end{aligned} \quad (16)$$

де ε_0 — максимальна деформація; k — експоненційний градієнт (пов'язаний із матеріалом); δ — коефіцієнт кутової анізотропії (через гострі кути); θ — кутова координата ($0-2\pi$).

Результати чисельного моделювання засвідчили, що у випадку пентагональної геометрії індентора формується анізотропне поле деформацій з чітко вираженими локальними максиму-

мами в напрямках, що відповідають вершинам п'ятикутника. Це зумовлює формування характерної пелюсткової структури мікротвердості, яка не проявляється у випадку гексагональної конфігурації індентора.

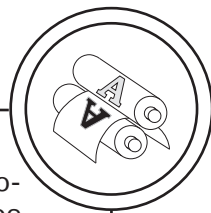
Градiєнт зміцнення, який визначається як перша похідна мікротвердості за радіусом, становить основу для кількісного опису просторового розподілу деформацій у поверхневому шарі.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} &= \varepsilon_0 \cdot k \cdot e^{-kr} \cdot \\ &\cdot (1 + \delta \cdot \cos(n\theta)). \end{aligned} \quad (17)$$

Для випадку гексагонального індентора цей градієнт є радіально симетричним, що пояснюється відсутністю кутового впливу, тобто параметр модуляції $n = 0$. Натомість для пентагонального індентора значення $n = 5$ вказує на наявність кутової модуляції, яка суттєво впливає на локальне формування зон деформації.

Похідна по радіусу в пентагональному випадку має виражену кутову модуляцію, що призводить до локального зростання градієнта зміцнення в напрямках, орієнтованих на вершини п'ятикутника. Це, у свою чергу, зумовлює просторову неоднорідність структури зміцненого шару та появу концентрованих областей з підвищеною мікротвердістю. Таким чином, форма індентора суттєво впливає не лише на загальну величину локального зміцнення, але й на його просторову структуру.

Запропонована узагальнена модель мікротвердості враховує



тип індентора та форму контактної поверхні, що дозволяє описати два принципово різні сценарії.

$$H(r, \theta) = H_0 + \alpha \cdot \varepsilon_p(r, \theta). \quad (18)$$

У випадку гексагонального індентора формується рівномірне кільцеве зміцнення, яке забезпечує стабільну і відтворювану топографію поверхні. У разі пентагонального індентора зміцнення набуває характеру радіально-кутової хвильової поверхні, з максимумами мікротвердості в напрямках вершин, що формує своєрідну пелюсткову структуру.

Фізичний наслідок такого типу зміцнення полягає в тому, що пентагональна форма робочої частини індентора сприяє посиленню локального зміцнення у визначених напрямках, однак знижує повторюваність топографії рельєфу, що може бути важливим для технологій, де необхідна стабільна геометрія зміцненого шару.

Оцінка глибини вдавлення при однаковому навантаженні виконується за формулою (4), в якій враховано геометрію індентора через контактну площу A .

$$A_{\text{hex}} > A_{\text{pent}} \Rightarrow h_{\text{hex}} < h_{\text{pent}}. \quad (19)$$

Встановлено, що для пентагонального індентора, внаслідок меншої площі контакту порівняно з гексагональним, при однаковому зусиллі вдавлювання реалізується вищий середній контактний тиск. Це, своєю чергою, зумовлює глибше проникнення інструмента в матеріал, підвищуючи інтенсивність локального пластичного деформування та мікрозміцнення в приповерхневій зоні.

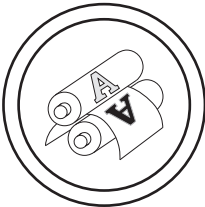
Разом із тим, підвищена локалізація напружень посилює чутливість результатів до варіацій фізико-механічних властивостей матеріалу, що необхідно враховувати при практичній реалізації технології.

Таким чином, геометрія інденторної головки істотно впливає як на глибину проникнення, так і на топологію зміцнення, що має принципове значення для задач підвищення зносостійкості робочих елементів фальцювального обладнання.

З урахуванням отриманих аналітичних та експериментальних даних, узагальнено ключові відмінності у поведінці матеріалу під дією інденторів різної геометрії. На цій основі сформовано порівняльну характеристику впливу пентагонального та гексагонального інденторів на розподіл пластичної деформації та формування зміцнювального мікрорельєфу, наведену у табл. 4.

Особливості формування деформаційної структури матеріалу безпосередньо відображаються у просторовому розподілі мікротвердості приповерхневого шару після індентування. Проведений аналіз показав, що характер цього розподілу істотно залежить від геометрії робочої частини інденторів, оскільки форма та симетрія інструмента визначають схему локалізації пластичних деформацій у зоні контакту.

Для пентагонального індентора розподіл мікротвердості в полярних координатах набуває анізотропного характеру з чітко вираженими локальними максимумами, орієнтованими у напрямках вершин п'ятикутника. Така конфігурація деформаційної струк-



Таблиця 4

Сумарні висновки порівняльного аналізу процесу пластичної деформації поверхневого шару фальцювальних елементів зі сталі AISI 304

Параметр	Гексагональний індентор	Пентагональний індентор
Середній тиск, p_m	Нижчий	Вищий
Глибина вдавлення, h	Менша	Більша
Форма деформації	Радіально симетрична	Радіально-анізотропна (5-кутна)
Гradient зміцнення	Плавний	Локалізований
Мікротвердість, H	Однорідна	Хвильова, з максимумами
Повторюваність результатів	Вища	Нижча

тури зумовлює формування хвильової «пелюсткової» топографії мікрозміцнення, яка не спостерігається у разі використання гексагонального інструмента.

Для візуального порівняння ефектів інденторів різної геометрії наведено порівняльні графіки, сформовані за допомогою програми MATLAB (рис. 10, 11), які ілюструють просторові відмінності у профілях мікротвердості залежно від симетрії інструмента. Зокрема, гексагональний індентор формує рівномір-

ний кільцевий розподіл, тоді як пентагональний — локалізовані зони зміцнення з радіально-кутовою анізотропією.

Аналіз отриманих графіків засвідчив, що гексагональний індентор формує симетричний круговий розподіл пластичної деформації та мікротвердості, що відповідає осесиметричному характеру навантаження. Такий розподіл забезпечує рівномірне зміцнення поверхневого шару без локальних концентрацій напружень, що є ефективним для підвищен-

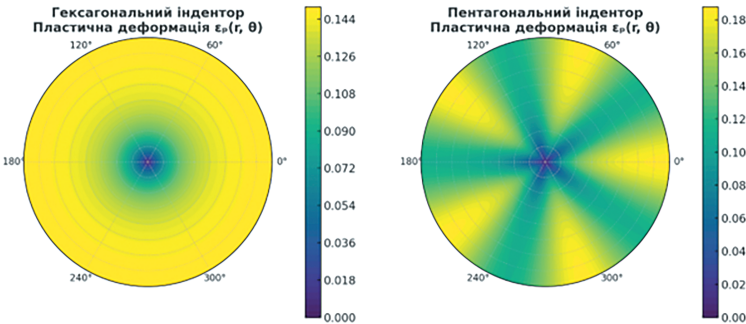
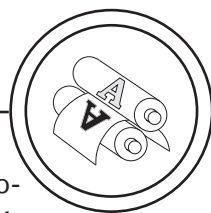


Рис. 10. Графіки порівняння розподілу пластичної деформації $\epsilon_p(r, \theta)$ (гексагональний та пентагональний індентор) в полярних координатах



ня загальної зносостійкості елементів фальцювальних систем.

Водночас, пентагональна геометрія індентора зумовлює формування анізотропного поля мікротвердості, в якому спостерігаються виражені «пелюсткові» зони підвищеного зміцнення в напрямках кутів п'ятикутника. Це свідчить про локалізацію деформації поблизу вершин, що підвищує градієнт зміцнення в цих зонах.

Таким чином, встановлено суттєвий вплив геометрії індентора на механізми накопичення пластичної деформації та характер зміцнювального мікрорельєфу. Гексагональні індентори доцільно застосовувати в задачах рівномірного армування, де важлива повторюваність структури поверхні. Пентагональні індентори можуть бути ефективно використані для функціонального армування напрямних поверхонь, в яких потрібна селективна локалізація зміцнення відповідно до характеру експлуатаційного навантаження.

Запропонований підхід відкриває можливості керованого налаштування геометрії інструментів зміцнення відповідно до ін-

женерних вимог фальцювального обладнання, що сприяє підвищенню його ресурсу та надійності в умовах багаторазових циклічних навантажень.

Висновки

1. Сформульовано теоретичні засади фізико-механічного моделювання процесу індентування, які враховують вплив багатогранної геометрії інденторів на формування зміцнювального мікрорельєфу. Встановлено, що ключовими чинниками є кількість вершин, кутова симетрія, площа проєкції інструмента та концентрація напружень у зонах вдавлення.

2. Розроблено фізико-механічну модель локального поверхневого зміцнення сталі AISI 304, яка описує взаємозв'язок між геометрією інденторної головки, механічними властивостями матеріалу та контактними параметрами. Модель базується на використанні критерію Губера-Мізеса та підходу радикального занурення для опису глибини пластичної деформації та градієнтів твердості.

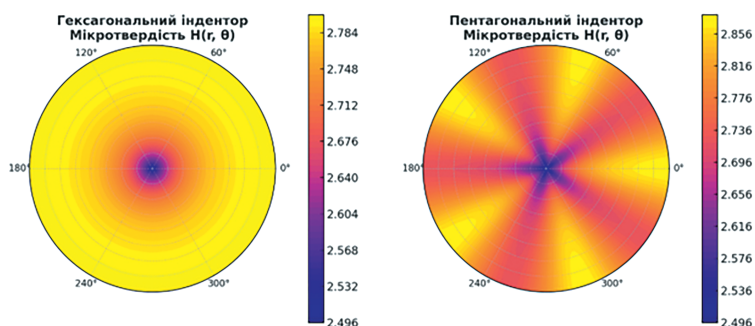
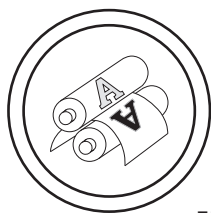


Рис. 11. Графіки порівняння розподілу мікротвердості $H(r, \theta)$ (гексагональний та пентагональний індентор) в полярних координатах



3. Здійснено чисельне моделювання пластичної деформації при вдавлюванні інденторів пентагональної та гексагональної геометрії. Установлено, що гексагональні індентори формують осесиметричне поле деформацій, тоді як пентагональні — створюють кутову модуляцію та «пелюсткову» структуру з локалізованими зонами зміцнення. Визначено конфігурації залишкових напружень та особливості рельєфної структури зміцненої зони.

4. Проведено порівняльний аналіз ефективності інденторів

різної геометрії. Виявлено, що гексагональні індентори забезпечують стабільну, повторювану топографію зміцнення з меншими глибинами проникнення, тоді як пентагональні — генерують вищі контактні тиски, глибші зони деформацій та виражену анізотропію зміцнення. Обґрунтовано доцільність використання кожного типу інденторів залежно від вимог до рівномірності зміцнення або необхідності функціонального армування напрямних ділянок.

Список використаної літератури

1. Kyrychok P. Determining of the effect of reinforcing microrelief guides on the efficiency of folding integrated covers / P. Kyrychok, D. Paliukh // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. 4(1(130)). pp. 97–111. URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/309481>.

2. Хітров І. О. Відновлення деталей пластичним деформуванням та способи для його здійснення / І. О. Хітров, Ю. А. Кононогов // *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. 35(74)(1). URL: https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2024/1_2024/part_2/32.pdf.

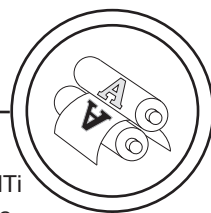
3. Паніна В. В. Зміцнення деталей за допомогою поверхнево-пластичної деформації / В. В. Паніна, В. В. Дідур., І. С. Серий, Т. С. Чорна // *Науковий вісник ТДАТУ*. 2020. 10(2). С. 148–155. URL: <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/12954>.

4. Li Y. Effects of surface severe plastic deformation on the mechanical behavior of 304 stainless steel / Y. Li, Z. Lu, T. Li, D. Li, J. Lu, P. K. Liaw, Y. Zou // *Metals*. 2020. 10(6). pp. 831. URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/6/831>.

5. Wang P. A comparative study of indentation size effect models for different materials / P. Wang, Y. Gao, P. Wang // *Scientific Reports*. 2024. 14. 20010. URL: https://www.nature.com/articles/s41598-024-71136-5?utm_source=chatgpt.com.

6. Tiwari A. Plastic deformation of rough metallic surfaces / A. Tiwari, A. Almqvist, B. N. J. Persson // *Tribology Letters*. 2020. 68. 129. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s11249-020-01368-9?utm_source=chatgpt.com.

7. Zhang L. A mini-review of surface severe plastic deformation methods and their effects on steel and stainless steel / L. Zhang, Z. Wu // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2021. 235(10). pp. 2164–2176. URL: https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/14644207231190491?icid=int.sj-full-text.similar-articles.2&utm_source=chatgpt.com.



8. Zhang X. Microstructure and nanoindentation behavior of FeCoNiAlTi high-entropy alloy-reinforced 316L stainless steel composite fabricated by selective laser melting / X. Zhang, D. Yang, Y. Jia, G. Wang // *Materials*. 2023. 16(5). 2022. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/5/2022>.

9. Huber N. Densification of nanoporous metals during nanoindentation: The role of structural and mechanical properties / N. Huber, I. Ryl, Y. Wu, M. Hablitzel, B. Zandersons, C. Richert, E. Lilleodden // *Journal of Materials Research*. 2023. 38(3). pp. 853–866. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023JMatR..38..853H/abstract>.

10. Zhang X. Research on fast nanoindentation technology to analyze the non-homogeneity of IF steel / X. Zhang, C. Zhang, Y. Li, Z. Wu, J. Li, Q. Ge // *Metals*, 2024. 14(12). pp. 1429. URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/14/12/1429>.

11. Rezaee-Hajidehi M. Indentation-induced martensitic transformation in SMAs: Insights from phase-field simulations / M. Rezaee-Hajidehi, K. Tüma, S. Stupkiewicz // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2023. 245. pp. 108100. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0020740323000024>.

12. Zhang C. Microstructure and correlated mechanical properties study of Ni–(Fe, Co)–Mn–(Al, In) as-spun ribbons / C. Zhang, L. Porcar, S. Miraglia, P. Donnadieu, M. Braccini, R. Haettel, M. Verdier // *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. 905. pp. 164139. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838822005308>.

13. Li S. Development of a new temperature-dependent yield criterion for stainless and high-strength alloy steels in construction engineering / S. Li, W. Ding, Q. Zhang. *Case Studies in Construction Materials*. 2023. 18. e02149. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509523003297>.

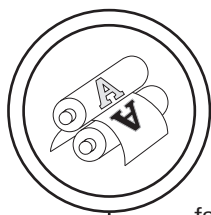
14. Hutchings I. M. The contributions of David Tabor to the science of indentation hardness / I. M. Hutchings // *Journal of Materials Research*, 2009. 24(3), pp. 581–589. <https://www.smf.phy.cam.ac.uk/system/files/documents/HutchingsTabor2009.pdf>.

References

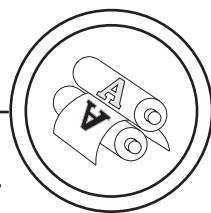
1. Kyrychok, P., & Paliukh, D. (2024). Determining of the effect of reinforcing microrelief guides on the efficiency of folding integrated covers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1(130)), 97–111. Retrieved from <https://journals.urau.ua/eejet/article/view/309481> [in English].

2. Khitrov, I. O., & Kononohov, Yu. A. (2024). Vidnovlennia detalei plastychnym deformuvanniam ta sposoby dlia yoho zdiisnennia [Restoration of parts by plastic deformation and methods for its implementation]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky*, 35(74)(1). Retrieved from https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2024/1_2024/part_2/32.pdf [in Ukrainian].

3. Panina, V. V., Didur, V. V., Sieryi, I. S., & Chorna, T. S. (2020). Zmitsnennia detalei za dopomohoiu poverkhnevo-plastychnoi deformatsii [Strengthening of parts by means of surface-plastic deformation]. *Naukovyi visnyk TDATU*, 10(2), 148–155. Retrieved from <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/12954> [in Ukrainian].



4. Li, Y., Lu, Z., Li, T., Li, D., Lu, J., Liaw, P. K., & Zou, Y. (2020). Effects of surface severe plastic deformation on the mechanical behavior of 304 stainless steel. *Metals*, 10(6), 831. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/6/831>.
5. Wang, P., Gao, Y., & Wang, P. (2024). A comparative study of indentation size effect models for different materials. *Scientific Reports*, 14, 20010. Retrieved from https://www.nature.com/articles/s41598-024-71136-5?utm_source=chatgpt.com.
6. Tiwari, A., Almqvist, A., & Persson, B. N. J. (2020). Plastic deformation of rough metallic surfaces. *Tribology Letters*, 68, 129. Retrieved from https://link.springer.com/article/10.1007/s11249-020-01368-9?utm_source=chatgpt.com.
7. Zhang, L., & Wu, Z. (2021). A mini-review of surface severe plastic deformation methods and their effects on steel and stainless steel. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 235(10), 2164–2176. Retrieved from https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/14644207231190491?icid=int.sj-full-text.similar-articles.2&utm_source=chatgpt.com.
8. Zhang, X., Yang, D., Jia, Y., & Wang, G. (2023). Microstructure and nanoindentation behavior of FeCoNiAlTi high-entropy alloy-reinforced 316L stainless steel composite fabricated by selective laser melting. *Materials*, 16(5), 2022. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/5/2022>.
9. Huber, N., Ryl, I., Wu, Y., Hablitzel, M., Zandersons, B., Richert, C., & Lilleodden, E. (2023). Densification of nanoporous metals during nanoindentation: The role of structural and mechanical properties. *Journal of Materials Research*, 38(3), 853–866. Retrieved from <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023JMatR..38..853H/abstract>.
10. Zhang, X., Zhang, C., Li, Y., Wu, Z., Li, J., & Ge, Q. (2024). Research on fast nanoindentation technology to analyze the non-homogeneity of IF steel. *Metals*, 14(12), 1429. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2075-4701/14/12/1429>.
11. Rezaee-Hajidehi, M., Tüma, K., & Stupkiewicz, S. (2023). Indentation-induced martensitic transformation in SMAs: Insights from phase-field simulations. *International Journal of Mechanical Sciences*, 245, 108100. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0020740323000024>.
12. Zhang, C., Porcar, L., Miraglia, S., Donnadieu, P., Braccini, M., Haettel, R., & Verdier, M. (2022). Microstructure and correlated mechanical properties study of Ni–(Fe, Co)–Mn–(Al, In) as-spun ribbons. *Journal of Alloys and Compounds*, 905, 164139. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838822005308>.
13. Li, S., Ding, W., & Zhang, Q. (2023). Development of a new temperature-dependent yield criterion for stainless and high-strength alloy steels in construction engineering. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02149. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509523003297>.
14. Hutchings, I. M. (2009). The contributions of David Tabor to the science of indentation hardness. *Journal of Materials Research*, 24(3), pp. 581–589. Retrieved from <https://www.smf.phy.cam.ac.uk/system/files/documents/HutchingsTabor2009.pdf>.



The object of this study is the process of local surface hardening of steel folding system components by means of indentation using tools with polygonal geometries – specifically, pentagonal and hexagonal shapes. A contact interaction model was developed using the Huber–Mises yield criterion under axisymmetric assumptions and incorporating a deep-indentation (radical penetration) approach. The findings can be applied to the engineering of folding system elements in printing equipment, aiming to improve their service life and operational reliability under cyclic loading.

Keywords: indentation; indenter geometry; hardening microrelief; plastic deformation; contact mechanics; folding elements, AISI 304.

Надійшла до редакції 18.10.24