

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора
Власовця Віталія Михайловича на дисертацію
Телятник Інни Анатоліївни «Дослідження деформаційного зміцнення
робочих поверхонь ґрунтообробних машин гідроімпульсним
навантаженням», подану на здобуття наукового ступеня доктора
філософії за спеціальністю 132 Матеріалознавство
галузі знань 13 Механічна інженерія

Актуальність обраної теми, її зв'язок з науковими програмами

Актуальність дослідження деформаційного зміцнення робочих поверхонь ґрунтообробних машин гідроімпульсним навантаженням визначається нагальними викликами сучасного матеріалознавства у розумінні взаємозв'язків між швидкісною пластичною деформацією, еволюцією дислокаційної структури та формуванням градієнтних функціональних поверхневих шарів.

Провідні світові дослідницькі центри (MIT, Max Planck Institute for Iron Research) демонструють, що інтенсивна пластична деформація за високих швидкостей навантаження (10^2 - 10^4 с⁻¹) ініціює унікальні мікроструктурні перетворення, недосяжні за квазістатичних умов. Формування нанокристалічних поверхневих шарів через механічне подрібнення зерен, активація двійникування як альтернативного механізму деформації та створення високої густини геометрично необхідних дислокацій у градієнтних структурах відкривають нові шляхи керування механічними властивостями без зміни хімічного складу матеріалу за рахунок пластичної деформації.

На сьогоднішній день розуміння кінетики мікроструктурних трансформацій під час імпульсного навантаження з контрольованими енергетичними параметрами є недостатнім. Традиційні методи поверхнево-пластичної деформації (дробоструменева обробка, ультразвукова обробка та інш.) характеризуються нерівномірністю впливу та обмеженою керованістю. Гідроімпульсне навантаження, завдяки прецизійному контролю енергії удару, частоти імпульсів та траєкторії деформуючого інструменту, створює можливість систематичного дослідження залежності «енергія-структура-фазовий склад-властивості» у діапазоні, що відповідає переходу від дислокаційного ковзання до деформаційного двійникування. Сучасний підхід до дизайну матеріалів підкреслює перевагу таких структур із контрольованими градієнтами властивостей: поверхня з ультрависокою твердістю, що в ряді випадків забезпечує високу зносостійкість, поєднується із градієнтним переходом до пластичних структур, які мають підвищену тріщиностійкість. В той же час особлива актуальність полягає у дослідженні теплових ефектів високошвидкісної деформації. За швидкостей деформації $>10^3$ с⁻¹ нагрів може досягати 300-350°C у локальних зонах, ініціюючи динамічну рекристалізацію,

виділення дисперсної карбідної фази або ініціювати фазові перетворення у мікрооб'ємах вуглецевих сталей. Конкуренція між деформаційним зміцненням та зворотніми процесами, викликаними термічним впливом, визначає кінцеву мікроструктуру, але залишається недостатньо вивченою для імпульсних режимів навантаження.

Таким чином дослідження гідроімпульсного деформаційного зміцнення робочих поверхонь ґрунтообробних машин зумовлено потребою керованого формування градієнтних функціональних шарів за високошвидкісної пластичної деформації. В той же час прецизійний контроль енергії імпульсу відкриває шлях до оптимізації зносостійкості без зміни складу та з меншим енерговитратами, що відповідає цілям European Green Deal та зумовлює актуальність вирішуваної проблеми.

Дисертаційна робота Телятник Інни Анатоліївни виконана в межах науково-дослідної діяльності Вінницького національного аграрного університету й безпосередньо пов'язана з реалізацією програм наукових досліджень, затверджених наказами МОН України. Тематика дослідження відповідає пріоритетним напрямам розвитку науки і техніки України, зокрема - у галузі матеріалознавства та сільськогосподарського машинобудування. Робота також виконувалась в межах ініціативної науково-дослідної роботи на інженерно-технологічному факультеті «Створення та застосування нових технологій пластичного формозмінення з використанням прогресивних методів дослідження механіки деформування для отримання деталей з покращеними експлуатаційними характеристиками» (№ 0122U002097, термін виконання 03.2022 р. – 03. 2026 р.). Таким чином, тематика дисертації повністю інтегрована у тематичні напрями державних наукових програм, є частиною виконання міжкафедральних досліджень і відображає актуальні завдання, поставлені перед профільними кафедрами та науковими підрозділами університету.

Результати дослідження використовуються в науково-освітній діяльності закладу, у підготовці фахівців технічного профілю, а також в реалізації спільних проєктів з агропідприємствами регіону. Відповідність роботи програмам і темам підтверджує її належність до цільових державних досліджень, а також значущість у межах прикладної науки й виробництва

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Наукові положення, висновки та рекомендації, викладені у дисертаційній роботі Телятник Інни Анатоліївни, відзначаються достатнім рівнем обґрунтованості та підтверджуються результатами експериментальних і прикладних досліджень, проведених із дотриманням вимог до достовірності наукових даних.

Перший висновок про домінуючу роль абразивного зношування ґрунтується на аналізі понад 45 літературних джерел, включаючи роботи вітчизняних дослідників та закордонні публікації з трибології та матеріалознавства. Висновок підтверджено систематичним аналізом типових дефектів робочих органів плугів, культиваторів та дискових борін з встановленням критичних параметрів зношування. Для різних типів ґрунтів визначено специфічні механізми деградації: абразивне зношування з формуванням канавок на піщаних та супіщаних ґрунтах, полідеформаційне руйнування на суглинкових та глинистих ґрунтах. Обґрунтованість спрямованості дослідження на розробку процесу деформаційного зміцнення підтверджується критичним аналізом існуючих підходів (термічні методи, наплавлення, напилення) з виявленням їх обмежень: високої енергоємності, термічних деформацій, складності обладнання, обмеженої глибини зміцненої зони.

Другий висновок визначено з врахуванням необхідної енергії деформування конструкційних сталей та обґрунтовано інженерним розрахунком з перевіркою прототипу в експлуатації. Робочий діапазон параметрів (тиск 5,6 МПа, частота 25-50 Гц, амплітуда 2 мм) встановлено на основі балансу між достатньою енергією удару для пластичної деформації матеріалів та обмеженнями на теплове розупорядкування.

Третій висновок стосовно розробки математичної моделі циклу роботи гідроімпульсного пристрою для керування деформаційним впливом ґрунтується на використанні пружно-зосередженої моделі енергоносія з представленням гідравлічної ланки тілом Кельвіна-Фойгта. Модель включає диференціальне рівняння руху ланок пристрою, рівняння витрати енергоносія, визначення передаточного відношення, жорсткості безінерційного пружного елемента та сили в'язкого опору дисипативного елемента. Доведено рівняння, що визначає закон зміни сили ударної дії з точки зору теорії контактних пружних деформацій залежно від форми ударника. Обґрунтованість математичних описів підтверджено порівнянням теоретично розрахованих циклограм робочого циклу з експериментально зареєстрованими осцилограмами зміни тиску в напірній порожнині та переміщення виконавчих елементів. Умовна циклограма включає всі критичні етапи: нарощування тиску, переміщення золотника у робоче положення, генерація імпульсу, повернення золотника у закрите положення.

Четвертий висновок про оптимальні параметри процесу обґрунтовано систематичними експериментальними дослідженнями. Вибір сферичного ударника діаметром 10 мм підтверджено порівняльними випробуваннями ударників діаметром 4, 6, 8 і 10 мм з визначенням їх впливу на формування напружених зон без критичної локалізації деформації. Оптимальний режим (частота 20-35 Гц при амплітуді вібрацій до 2 мм) встановлено на основі аналізу

характеру навантаження з використанням методу осцилографування динамічних параметрів. Діапазон оптимальної енергії удару 5-80 Дж обґрунтовано експериментальними дослідженнями з варіюванням діаметра ударника (4-40 мм) та початкового мікроструктурного стану матеріалу (мартенситна, сорбітна структури сталі 65Г). Встановлено, що мартенситна структура характеризується найбільшою глибиною наклепаної зони (на 40-60% більше порівняно з сорбітною структурою), що узгоджується з теоретичними уявленнями про вищу густину дислокаційних джерел у мартенситі. Для конструкційних сталей визначено ступінь пластичної деформації у межах 0,3-0,7, що відповідає критеріям формування градієнтних структур без поверхневих тріщин.

П'ятий висновок про високу ефективність процесу ППД обґрунтовано результатами комплексних експериментальних досліджень. Підвищення твердості оброблюваної поверхні до 73% підтверджено систематичними вимірюваннями за методом Бринелля на дослідних зразках сталі 65Г після гідроімпульсної обробки з різними енергетичними параметрами. Експериментально встановлено градієнт коефіцієнта пластичної деформації, що узгоджується з теоретичними розрахунками розподілу пластичної деформації при контактному навантаженні. Зростання мікротвердості на 25-50% залежно від глибини підтверджено статистичною обробкою результатів вимірювань з визначенням необхідної кількості точок та розрахунком середньоквадратичної похибки. Підвищення напрацювання робочих органів до 43% при експлуатаційних випробуваннях підтверджено виробничими випробуваннями дослідної партії лап культиваторів в реальних умовах обробітку ґрунту з фіксацією параметрів зношування через встановлені інтервали напрацювання.

Розроблені рекомендації обґрунтовано узагальненням результатів теоретичних та експериментальних досліджень. Технологічна придатність процесу підтверджена успішним випробуванням у виробничих умовах при відновленні культиваторних лап та лемішів на підприємствах ТОВ «Агромаш-Калина» і ТОВ «АБА «АСТРА», що підтверджено актами впровадження та виробничої перевірки.

Результати, висновки та рекомендації апробовані також в наукових публікаціях і на конференціях, що додатково засвідчує їхню релевантність, практичну придатність і наукову вартість. Усі висновки є логічним завершенням поставлених у роботі завдань і ґрунтуються на репрезентативних даних, що робить їх достовірними і обґрунтованими як з наукової, так і з прикладної точки зору.

Повнота викладу результатів дисертаційної роботи в опублікованих працях

Основні результати дослідження опубліковані у 21 науковій праці, у тому числі: 7 статей у наукових фахових виданнях України (категорії Б); 1 – у фахових виданнях інших держав та 1 – у наукових журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science Core Collection; 12 тез доповідей у збірниках матеріалів наукових конференцій.

Наукова новизна одержаних результатів та їх значення для науки та виробництва

1. Вперше для процесу гідроімпульсного зміцнення конструкційних сталей визначено, що послідовна дія повторних імпульсів призводить до накопичення пластичної деформації навіть у випадках, коли одиночний імпульс зумовлює лише пружну реакцію матеріалу. Встановлено формування градієнтної структури з максимальною інтенсивністю деформації на поверхні ($\varepsilon_{\max} = 2,7$) та експоненційним спаданням до глибини 1,5 мм ($\varepsilon_{\min} = 0,1$), що забезпечує комбінацію високої поверхневої твердості (підвищення на 37-46%) з об'ємною пластичністю основного матеріалу.

2. Вперше на основі розробленої інтегрованої математичної моделі робочого циклу гідроімпульсного пристрою, яка поєднує показники гідродинаміки, кінематику виконавчих ланок та контактну взаємодію деформуючого елемента з оброблюваною поверхнею встановлено нові залежності, які дозволили спрогнозувати розподіл пластичної деформації у поверхневому шарі за рахунок керування енергією деформівної зони залежно від конструктивних параметрів імпульсного устаткування та режимів обробки. Встановлені залежності дозволили науково обґрунтувати технологічні параметри процесу пластичного деформування для досягнення заданих експлуатаційних характеристик.

3. Отримав подальший розвиток експериментально-аналітичний підхід до кількісної оцінки ефективності процесів деформаційного зміцнення робочих поверхонь деталей сільськогосподарської техніки, який враховує енергетичні параметри гідроімпульсного удару, геометрію контактної взаємодії та характеристики сформованої градієнтної структури. Підхід дозволяє встановити функціональні залежності між вхідними параметрами обробки (енергія, частота, геометрія ударника), твердістю зміцненого шару (розподіл твердості, мікротвердості) та експлуатаційними властивостями (підвищення довговічності, зростання зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин). Виробнича апробація підтвердила можливість цілеспрямованого керування структурно-фазовим станом поверхневого шару для максимізації довговічності виробів.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність в цілому

Дисертація Телятник Інни Анатоліївни побудована відповідно до вимог, установлених до кваліфікаційних робіт на здобуття ступеня доктора філософії. Робота складається зі вступу, чотирьох змістовних розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг становить 189 сторінок, з яких 160 – основний текст, 14 – список використаних джерел (116 найменувань), 16 – додатки. Робота містить 66 рисунків і 9 таблиць, що наочно ілюструють хід та результати дослідження.

У **вступі** обґрунтовано актуальність дослідження проблеми зносостійкості робочих органів ґрунтообробної техніки, де абразивне зношування становить понад 60% від загального обсягу втрат. Чітко сформульовано мету - підвищення зносостійкості робочих поверхонь органів ґрунтообробних машин поверхнево-пластичною деформацією при гідроімпульсному впливі. Представлено наукову новизну, що включає встановлення закономірностей розподілу пластичної деформації, розробку математичної моделі циклу роботи гідроімпульсного пристрою та удосконалення експериментально-аналітичного підходу до оцінювання ефективності процесу.

Перший розділ присвячений комплексному аналізу методів і обладнання для деформаційного зміцнення робочого шару деталей сільськогосподарських машин. Проведено ґрунтовний огляд процесів зношування робочих органів плугів, культиваторів та дискових борін з встановленням критичних параметрів зношування та механізмів їх руйнування. Розглянуто конструкційні матеріали різного ступеню легованості та зміцнювальної обробки та порівняно їх механічні характеристики. Детально проаналізовано механізми деформаційного наклепу в полікристалічних матеріалах, що супроводжуються зміною форми зерен, формуванням деформаційної текстури та підвищенням густини дислокацій. Особливу увагу приділено конструктивним особливостям віброзбуджувачів для реалізації поверхнево-пластичної деформації, серед яких гідроімпульсні приводи визначено як найбільш компактні та перспективні завдяки забезпеченню значних зусиль при порівняно низькому робочому тиску.

Другий розділ обґрунтовує умови для реалізації поверхнево-пластичної деформації за рахунок раціонального компоновання та запровадження конструктивних рішень для оптимізації роботи гідроімпульсного приводу. Визначено ключові вимоги до гідроімпульсного приводу, а саме мінімізація об'єму напірної порожнини та стабільність амплітудно-частотної характеристики. Запропоновано структурну схему пресу з електрогідравлічним керуванням для реалізації керованої поверхнево-пластичної деформації, центральним елементом якого є комбінований гідроімпульсний пристрій з генератором імпульсів тиску. Детально досліджено вплив геометричної форми ударника на формозміну локальних зон зміцнення, запропоновано форму ударника що є оптимальною для створення напружених зон без надмірної

локалізації деформації. Теоретично обґрунтовано параметри технології зміцнення з використанням гідроімпульсного пристрою.

Третій розділ присвячений дослідженню закономірностей деформаційного зміцнення робочого шару деталей при застосуванні гідроімпульсного пристрою з апробацією різних режимів обробки. Для сталі 65Г експериментально визначено зону поширення пластичної деформації з коефіцієнтом від $\epsilon_{\max} = 2,7$ на поверхні контакту до $\epsilon_{\min} = 0,1$ на глибині $h \approx 1,5$ мм. Встановлено, що мартенситна структура характеризується найбільшою глибиною наклепаної зони (на 40-60% більше порівняно з сорбітною структурою). Визначено оптимальний діапазон енергії удару 15-50 Дж залежно від діаметра ударника (4-40 мм) та властивостей матеріалу.

Четвертий розділ містить результати виробничого дослідження запропонованої технології зміцнення з оцінкою механізмів деформації при динамічному поверхнево-пластичному деформуванні та теплового циклу на поверхні заготовки. Встановлено закономірності зміни робочих параметрів пресу та підтверджено адекватність розроблених математичних моделей. Досліджено механізм деформаційного зміцнення при динамічному поверхнево-пластичному деформуванні з виділенням трьох послідовних фаз: просте ковзання, комплексне ковзання з інтенсивним зростанням густини дислокацій, динамічна рівновага з процесами динамічного повертання. Встановлено, що прискорення навантаження до 100 м/с призводить до збільшення межі текучості: для сталі 65Г – у 2,8 рази, для сталі 50 – у 3 рази. Проведено дослідження теплового циклу з виявленням нагріву до 350°C при ударній дії. Виробничі випробування дослідної партії лап культиваторів показали: підвищення твердості на 37-46%, зростання мікротвердості на 25-50%, збільшення напрацювання робочих органів при експлуатації до 43%.

Загальні висновки систематизують основні результати, отримані в дисертації, підтверджено виконання поставленої мети та завдань, відображено наукову новизну, практичне значення і можливість впровадження результатів дослідження.

Дисертація написана державною мовою, витримана в науковому стилі, з правильно оформленими таблицями, формулами, ілюстраціями та посиланнями. Нумерація елементів відповідає встановленим стандартам. Розділи логічно пов'язані між собою, кожен з них має чітко визначену функцію у загальній структурі роботи.

Таким чином, структура, зміст та оформлення дисертації відповідають встановленим вимогам, а сама робота є завершеним, обґрунтованим і самостійно виконаним дослідженням, що цілком відповідає рівню кваліфікаційної роботи доктора філософії.

Відсутність порушення академічної доброчесності

На підставі ретельного аналізу тексту дисертаційної роботи, вивчення опублікованих наукових праць здобувача, а також розгляду офіційного звіту з перевірки рукопису за допомогою електронного антиплагіатного сервісу, не встановлено фактів порушення академічної доброчесності. Усі використані автором положення, ідеї, цитати та результати інших дослідників супроводжуються відповідними бібліографічними посиланнями, що свідчить про дотримання норм академічного цитування та наукової етики.

Основні зауваження до дисертації

Дисертаційна робота Телятник Інни Анатоліївни виконана на достатньому науковому рівні, має завершену структуру й значне практичне значення. Водночас, у межах наукової дискусії та критичного аналізу можна виокремити низку положень і аспектів, які потребують уточнення, або можуть стати напрямами для подальшого вдосконалення дослідження.

1. Запропонована в роботі модель потребує уточнення. Енергія удару (заявлений оптимальний діапазон 5-50 Дж, що змінюється залежно від діаметра ударника 4-40 мм) опосередковано пов'язана зі змінами структури, фазового складу та отриманим градієнтом механічних властивостей. Відсутні дані щодо кількісного зв'язку між поглинутою роботою пластичної деформації і густиною дислокацій, критичними сукупностями параметрів стану для різних механізмів зміцнення, а також ефективністю перетворення енергії в накопичену енергію дефектів порівняно з тепловим розсіюванням.

2. Поверхнева пластична деформація може спричинити появу дефектів поряд з корисним зміцненням: поверхневі мікротріщини від надмірної деформації, зародження пустот від великих локальних деформацій, розтріскування границь зерен у крихких складових, а також створення локальних концентраторів напружень. Дослідження таких критичних параметрів обробки, за межами яких відбувається зародження пошкоджень, бажано доповнити даними фрактографічних досліджень та растрової електронної мікроскопії, енергодисперсійного аналізу.

3. В роботі стверджується, що ударна і статична обробка дають «практично однакову» глибину зміцнення для рівних діаметрів вдавнення, що потребує пояснення. Ударне навантаження з високою швидкістю деформації (10^2 - 10^4 с⁻¹) активує різні механізми деформації порівняно з квазістатичним навантаженням (10^{-3} - 10^{-1} с⁻¹). В роботі повідомляється про підвищення температури до 350°C під час удару, що могло б запуснути термоактивовані механізми перебудови дефектів, а саме активувати динамічне відновлення і, можливо, динамічну рекристалізацію, глибоко змінюючи дислокаційну субструктуру порівняно зі статичною деформацією при кімнатній температурі. Таке твердження про еквівалентність вимагає ретельного порівняльного

мікроструктурного аналізу за допомогою трансмісійної електронної мікроскопії.

4. Твердість є інтегральною емпіричною величиною на яку впливає значна кількість факторів. В роботі не вказано ряд показників, які важливі для аналізу отриманих даних: навантаження при вдавлюванні індентора, час витримки, відстань між вдавлюваннями для уникнення ефектів взаємодії, поправочні коефіцієнти для скупчення матеріалу навколо вдавлювань у загартованих поверхнях або статистичний аналіз розкиду твердості. Наші дослідження показують, що навіть на достатньо великих первинних спецкарбідах хрому мікротвердість може мати похибку до 50% навіть при врахуванні рекомендацій стандарту ASTM E384-17 «Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials».

5. В роботі не наведено обґрунтування вибору сталей 50 та 65Г як основного об'єкта дослідження, а також не досліджено, як склад сталей, вміст вуглецю, добавки марганцю та умови початкової термічної обробки впливають на результат деформаційного зміцнення. Дослідження обмеженого набору сталей може перешкодити встановленню узагальнюючих взаємозв'язків структура - фазовий склад - властивості, і дещо обмежити практичну застосовність розроблених рекомендацій.

6. В роботі стверджується про утворення «сприятливих стискаючих залишкових напружень», що поширюються на 10-50% глибше зміцненого шару, однак експериментальних досліджень, які обґрунтовують їх величину, розподіл та знак не наведено. Відсутній аналіз того, як еволюціонують залишкові напруження під час циклічного навантаження, температурних перепадів або трибологічних умов контакту, характерних для умов експлуатації сільськогосподарських знарядь.

7. Практична цінність роботи полягає в тому, що довговічність культиваторних лап підвищено на 43%, але відсутній системний трибологічний аналіз, що акцентує увагу на явищах, які відбуваються під час експлуатації. Абразивний знос включає складні механізми видалення матеріалу: мікрорізання, мікрозаглиблення, мікророзтріскування і розшарування, на кожен з яких по-різному впливає поверхнева твердість, підповерхнєве деформаційне зміцнення, залишкові напруження і мікроструктурні особливості. Такий аналіз дозволив би обґрунтувати, як поверхнева пластична деформація модифікує специфічні механізми зношування та розробити більш точні рекомендації щодо режимів зміцнення.

Зазначені дискусійні положення не знижують наукової та практичної цінності виконаного дослідження. Вони мають уточнювальний характер і можуть бути використані автором як напрями для подальших наукових пошуків та вдосконалення вже розробленої технології гідроімпульсного деформаційного зміцнення поверхневих шарів робочих органів машин. Робота в цілому заслуговує позитивної оцінки.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Телятник Інни Анатоліївни «Дослідження деформаційного зміцнення робочих поверхонь ґрунтообробних машин гідроімпульсним навантаженням», подана до спеціалізованої вченої ради для захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 Матеріалознавство, за рівнем актуальності, наукової новизни, обґрунтованості положень, достовірності отриманих результатів, практичної значущості, а також за повнотою їх апробації та оприлюднення у фахових наукових виданнях, відповідає вимогам, визначеним Порядком присудження ступеня доктора філософії, затвердженим постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 (із змінами, внесеними постановою КМУ № 507 від 03 травня 2024 року).

З огляду на викладене, вважаю, що Телятник Інна Анатоліївна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 Матеріалознавство.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри машинобудування
Львівського національного університету
ветеринарної медицини
та біотехнології імені С.З. Гжицького



Віталій ВЛАСОВЕЦЬ

