

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця на
правах рукопису

ТЕЛЯТНИК ІННА АНАТОЛІЇВНА

УДК 631.31:539.374:620.172.21(043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ РОБОЧИХ
ПОВЕРХОНЬ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН ГІДРОІМПУЛЬСНИМ
НАВАНТАЖЕННЯМ

132 Матеріалознавство

13 Механічна інженерія

Подається на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії

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

 Інна ТЕЛЯТНИК

Науковий керівник:

ПАЛАДІЙЧУК Юрій Богданович

кандидат технічних наук, доцент

Вінниця – 2026

АНОТАЦІЯ

Телятник І.А. Дослідження деформаційного зміцнення робочих поверхонь ґрунтообробних машин гідроімпульсним навантаженням. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – Матеріалознавство. – Вінницький національний аграрний університет, Вінниця, 2026.

У дисертаційній роботі вирішено важливу наукову проблему, пов'язану з підвищенням зносостійкості робочих органів ґрунтообробних сільськогосподарських машин. Це досягнуто завдяки теоретичному обґрунтуванню та визначенню оптимальних конструктивних і технологічних параметрів пристрою для зміцнення робочих поверхонь ґрунтообробних виконавчих органів, шляхом поверхнево пластичної деформації при гідроімпульсному навантаженні.

Вступ містить обґрунтування важливості проведеного дослідження, чітко сформульовану мету та перелік конкретних завдань, необхідних для її досягнення. Висвітлено новизну отриманих наукових результатів, практичну цінність роботи та вказано особисту участь автора в її виконанні. Надано інформацію про апробацію результатів, перелік публікацій, а також описано структуру та загальний обсяг дисертації.

Метою дослідження є підвищення зносостійкості робочих поверхонь органів ґрунтообробних сільськогосподарських машин поверхнево-пластичною деформацією гідроімпульсним навантаженням. Для досягнення цієї мети було проведено аналіз відомих процесів зношування та охарактеризовано параметри і особливості застосування методів поверхнево-пластичної деформації для підвищення зносостійкості. У ході роботи розроблено принципову схему пресу з гідроімпульсним приводом та створено математичну модель циклу роботи гідроімпульсного пристрою для деформаційного зміцнення, а також досліджено формозміну структури полікристалічних матеріалів при деформації. Крім того, розроблено експериментальний стенд з гідроімпульсним приводом для поверхнево-пластичного деформування деталей, що дозволило

експериментально встановити залежність параметрів твердості матеріалу від режимів роботи гідроімппульсного обладнання і конструктивних параметрів ударника. Результати дослідження включають виконання виробничих впроваджень та дослідження закономірностей робочих режимів гідроімппульсного навантаження.

Об'єкт дослідження – процес поверхнево-пластичного деформування робочих поверхонь виконавчих елементів ґрунтообробної техніки за умов гідроімппульсного навантаження.

Предмет дослідження – взаємозв'язок між параметрами сформованого поверхневого шару та технологічними режимами процесу поверхнево-пластичного деформування гідроімппульсним навантаженням.

У роботі проведено аналіз особливостей зношення робочих органів ґрунтообробних машин в умовах сучасного сільськогосподарського виробництва України. Наведено типові дефекти робочих органів плугів (лемешів, полиць, ножів), культиваторів (лап, стійок) та дискових борін (дисків), а також допустимі параметри зношування (ширина затуплення, довжина носка, ширина затилкової фаски), які є критеріями втрати працездатності та необхідності ремонту або заміни.

Розглянуто конструктивні та матеріалознавчі підходи, спрямовані на підвищення зносостійкості, зокрема використання матеріалів, з яких виготовляють робочі органи ґрунтообробних машин (сталь 50, 65Г), підкреслено важливість локального зміцнення найбільш навантажених ділянок для продовження терміну служби деталей. Аналіз наукових джерел показує, що питання підвищення зносостійкості переважно розглядаються з позицій термічного впливу на матеріал, у той час як геометричні фактори зношування залишаються недостатньо дослідженими.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що вперше встановлено закономірності розподілу пластичної деформації у поверхневому шарі конструкційних сталей за умов гідроімппульсного навантаження, що дозволило визначити граничну глибину наклепаної зони та характер її зміни залежно від енергетичних і геометричних параметрів ударного впливу. Також

вперше розроблено математичну модель циклу роботи гідроімпульсного пристрою, що забезпечує прогнозування ефективності процесу поверхнево-пластичної деформації та визначення енергії деформівної зони оброблювальної поверхні.

Отримали подальший розвиток підхід до оцінювання ефективності процесу поверхнево-пластичної деформації за врахування енергетичних параметрів гідроімпульсного удару та геометрії контактної взаємодії, що дозволяє кількісно пов'язати енергію навантаження з характеристиками деформованої зони, а також експериментально-аналітичний підхід до дослідження процесів деформаційного зміцнення, який поєднує модельні уявлення з експериментальними даними про розподіл пластичної деформації за глибиною поверхневого шару.

Перший розділ присвячений аналізу методів поверхнево-пластичного деформування як ефективного технологічного рішення для підвищення зносостійкості та надійності робочих органів ґрунтообробної техніки. Поверхнево-пластичне деформування (ППД) ґрунтується на здатності металу витримувати пружно-пластичну залишкову деформацію, що дозволяє без порушення цілісності матеріалу формувати якісний поверхневий шар.

При поверхнево-пластичній деформації підвищується твердість і міцність поверхні, утворюються сприятливі залишкові напруги стиску, що істотно знижує концентрацію напружень і покращує втомну міцність деталей. Крім того, ППД сприяє зменшенню шорсткості поверхні, формуванню дрібнозернистої структури та підвищеної стійкості до корозійного впливу.

Обробка методами ППД має суттєві переваги порівняно з іншими способами, включаючи відсутність термічних дефектів та можливість досягнення мінімальних параметрів шорсткості при збереженні вихідної форми заготовки.

Детально описано механізм деформаційного наклепу, що є наслідком пружно-пластичної деформації поверхневого шару металу при обробці методами пластичного деформування. Процес спричиняє глибокі структурні зміни у полікристалічних матеріалах: зерна металу змінюють свою форму,

подовжуючись і створюючи текстуру деформації з переважним орієнтуванням осей найбільшої міцності вздовж напрямку деформації. Це значно змінює мікроструктуру та спричиняє виникнення властивостей анізотропії.

Проаналізовано конструктивні особливості та типи віброзбуджувачів для реалізації ППД, ефект якого полягає у підвищенні зносостійкості та втомної міцності деталей за рахунок структурного зміцнення поверхневого шару.

Забезпечення імпульсної дії здійснюється за допомогою віброударних установок, а також вібраційних систем, що працюють у нестационарних режимах і мають узагальнену структурну схему, яка включає джерело енергії, привід та генератор вібрацій. Серед віброзбуджувачів, що застосовуються для деформаційного зміцнення, найбільш компактними та перспективними є гідроімпульсні приводи (ГІП), віднесені до гідравлічних систем з імпульсним характером дії.

Гідроімпульсні приводи (ГІП), основним елементом яких є генератор імпульсів тиску (ГІТ), забезпечують значні зусилля (до 100 кН) за умов компактної конструкції, порівняно низького робочого тиску (до 10 МПа) та можливості параметричного налагодження режимів роботи. Подальший розвиток цих систем пов'язаний із застосуванням комбінованих приводів, зокрема електрогідравлічних клапанів, які поєднують високу енергонасиченість гідравліки з можливістю програмного керування частотними характеристиками електромагнітних систем, забезпечуючи гнучке регулювання без втрати необхідної потужності.

У другому розділі визначено ключові вимоги до гідроімпульсного привода, призначеного для вібраційних і віброударних машин. Основними вимогами є мінімізація сумарного об'єму напірної порожнини для забезпечення максимальної жорсткості гідросистеми.

Конструкція ГІП має забезпечувати стабільність амплітудно-частотної характеристики навіть при нагріванні робочої рідини, а також бути простою в керуванні та обслуговуванні.

Вибір типу насоса залежить від номінального тиску спрацьовування p_1 : шестеренні (НШ) для $p_1 \leq 12,5$ МПа, та плунжерні з розвантажувальними пристроями для $p_1 \geq 12,5$ МПа.

Для амплітуди вібрації ≥ 2 мм рекомендовано циклові пружинні гідроаккумулятори з регуляторами тиску накопичення, які мінімально змінюють об'єм напірної порожнини та підтримують гідравлічну жорсткість.

Досліджено робочий цикл привода, який умовно поділяється на етапи: нарощування тиску, надходження сигналу на клапан, переміщення золотника у «робоче» положення, наступний імпульс на клапан, переміщення золотника у «закрите» положення. Використання блоку керування та датчиків тиску і переміщення дозволяє дистанційно та в режимі реального часу коригувати робочі параметри.

Розроблено принципову схему лабораторного стенда, що включає прес з електрогідравлічним керуванням для ППД, яка включає персональний комп'ютер (ПК), аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), блок керування (БК), електрогідравлічний клапан-пульсатор, гідроциліндри, датчиків тиску і переміщення, віброплиту та гідравлічну станцію.

Розроблена принципова гідрокінематична схема дослідного зразка гідроімпульсного пристрою для деформаційного зміцнення деталей. Пристрій використовується на стенді з різними формами робочих органів ґрунтообробної техніки.

Реєстрація параметрів під час експериментів проводиться методом осцилографування.

Аналізувався вплив геометричної форми ударника на процес ППД. Пластична деформація є незворотною зміною, що залежить від енергії удару, властивостей матеріалів та форми ударника.

Дослідження формозміни ударників є важливим для прогнозування терміну служби, оптимізації вибору матеріалів та розробки нових конструктивних рішень. Визначено ступінь деформації поверхні металів при

ударній дії сферичного ударника, відзначено роль скупчень дислокацій у зміцненні металів при деформації.

Основний фактор для конструювання є енергія зміцнення, яку доцільно забезпечити поєднанням силових ланок з пружними елементами ГІТ й ударника.

Представлена умовна циклограма робочого циклу пристрою ілюструє зміну тиску в напірній порожнині та переміщення сідла і поршня-ударника для випадку максимальної частоти імпульсів.

Для математичного опису динаміки робочого циклу, який об'єднано у два періоди (прямого та зворотного ходу), використовується «пружно-зосереджена модель» енергоносія. У цій моделі гідравлічну ланку привода представлено тілом Кельвіна-Фойгта (в'язко-пружна модель).

Крім того, у роботі визначено передаточне відношення, жорсткість безінерційного пружного елемента, силу в'язкого опору дисипативного елемента, а також встановлено зв'язок між тиском енергоносія та деформацією гідравлічної ланки.

У третьому розділі обґрунтовано доцільність застосування деформаційного зміцнення для робочих органів ґрунтообробної техніки, зокрема лемешів плугів і лап культиваторів. Показано, що обробка методами поверхнево-пластичної деформації може використовуватися як для відновлення геометричних параметрів, так і для зміцнення поверхневого шару. При цьому пластична деформація полікристалічних металів супроводжується перебудовою їх мікроструктури, яка проявляється у зміні форми та орієнтації зерен і формуванні деформаційної текстури. У результаті обробки ППД формується сприятливий напружено-деформований і фізичний стан поверхневого шару, що характеризується підвищенням твердості, утворенням залишкових напруг стиску та зменшенням мікронерівностей поверхні.

Проведенні експериментальні дослідження з відновлення різальних кромek робочих органів ґрунтообробної техніки методом пластичного деформування.

У ході експериментів варіювалися такі параметри: подача гідронасоса – 0 - $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; частота вхідного сигналу на електрогідравлічний клапан – 0 - 50 Гц з кроком 2,5 Гц;

Наведено конструктивні та технічні параметри дослідного зразка пресу. Серед ключових параметрів: площа поперечного перерізу плунжера вертикального гідроциліндра: $7,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; об'єм напірної порожнини гідросистеми привода W : $9,05 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$; подача насоса приводу вертикального гідроциліндра Q^n : $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; максимальне зусилля приводу вертикального гідроциліндра: $23 \cdot 10^4 \text{ Н}$; максимальний робочий тиск у гідросистемі: 14 МПа. маса виконавчої ланки (зведена): 300 кг.

Подальші дослідження були спрямовані на аналіз конструктивних рішень пресового обладнання для реалізації поверхнево-пластичної деформації з використанням гідроімпульсного приводу, що забезпечує формування ударних і віброударних навантажень із керованими параметрами. Показано, що ефективність пресового обладнання визначається насамперед типом приводу, який формує характер навантаження та енергетичні параметри процесу ППД.

У режимі ударного навантаження встановлено, що послідовна дія повторних імпульсів сили призводить до накопичення пластичної деформації у випадках, коли одиночний імпульс зумовлює лише пружну реакцію матеріалу. Для сталі 65Г експериментально визначено зону поширення пластичної деформації, при якій коефіцієнт пластичної деформації досягає максимального значення на поверхні контакту ударника ($\varepsilon_{\max} = 2,7$) та зменшується з глибиною до $\varepsilon_{\min} = 0,1$. Максимальна глибина деформованого поверхневого шару зафіксована на рівні $h \approx 1,5 \text{ мм}$.

Аналіз умов формування поверхневого шару при ППД показав, що визначальними параметрами процесу є співвідношення пружної та пластичної деформацій, площа контактної взаємодії, величина прикладеної сили та рівень контактних напружень. Ступінь пластичної деформації оцінювали відносним параметром $\varepsilon = d/D$, який для конструкційних сталей перебуває в межах 0,3...0,7. Встановлено, що мартенситна структура характеризується найбільшою глибиною наклепаної зони, тоді як сорбітна структура забезпечує мінімальну

глибину і інтенсивність наклепу. Показано, що глибина наклепаної зони зростає зі збільшенням сили деформації та за однакових діаметрів відбитків при ударному й статичному втискуванні є практично однаковою. Оптимальний діапазон енергії удару для конструкційних сталей становить 15-80 Дж.

Четвертий розділ присвячений випробуванню гідроімпульсного приводу і визначено мету виробничих досліджень пресу з гідроімпульсним приводом.

Установлено реальні закономірності зміни робочих параметрів пресу для імпульсного типу навантаження, адекватність роботи при параметричному налаштуванні та заданому законі зміни потоку рідини.

Виконано перевірку адекватності розроблених динамічної та математичної моделей ГП.

Окреслено завдання досліджень, які включали встановлення відповідності заданих та експериментальних параметрів вібронавантаження (амплітуди, частоти), закону зміни частоти проходження імпульсів тиску, а також залежність амплітуди та частоти ударів при подачі сигналів на електрогідравлічний клапан. Проведення досліджень здійснювалося на базі дослідного зразку пресу ІП-16. Методика дослідження передбачала виконання послідовних етапів: від попередньої підготовки зразка та планування експериментів до реєстрації динамічних параметрів, подальшої обробки результатів та побудови графічних залежностей.

Для забезпечення достовірності експериментальних даних використано формули для визначення необхідного числа вимірювань та розрахунку середньоквадратичної похибки, що включає систематичні, інструментальні, методичні та випадкові похибки вимірювального ланцюга.

Виробниче дослідження проводилося у декілька етапів для отримання даних щодо параметричного і регульованого керування вібропресом. При перевірці параметричного режиму керування було встановлено, що система керування не може адекватно працювати через перехідні процеси у напірній гідролінії.

Отримані результати досліджень показали, що за допомогою цієї системи керування можна отримати вібрації на виконавчій ланці в межах 1 до 60 Гц з

амплітудою коливань до 4 мм. Установлено залежності оптимального режиму, що визначались максимальною подачею насосу оптимальним діапазоном для отримання імпульсного типу навантаження 20-35 Гц з амплітудою вібрацій до 2 мм.

Мікроструктурний аналіз підповерхневої деформації при наклепі показав існування шарів опору матеріалу, пов'язаних з великим спотворенням ґратки внаслідок пластичності металу.

Дослідження механізму деформаційного зміцнення (для сталі 65Г) виділяє три послідовні фази:

Фаза I (Просте ковзання): Характеризується низьким показником зміцнення. На цьому етапі рух дислокацій відбувається майже виключно в одній активній системі ковзання.

Фаза II (Комплексне ковзання): Відбувається інтенсивне зростання коефіцієнта зміцнення. Це пов'язано з різким збільшенням густини дислокацій, що призводить до зростання кількості їх взаємодій та перетинань.

Фаза III (Динамічна рівновага): Коефіцієнт зміцнення знижується. Причиною цього є масове поперечне ковзання дислокацій та процеси динамічного повертання (рековері).

З метою ППД досліджено ударники діаметром 4, 6, 8, 10 мм. Визначено, що оптимальний діаметр – 10 мм, оскільки він дозволяє створювати напружені зони без суттєвого впливу на зону деформації.

Основною причиною зміцнення є лавиноподібний розвиток дислокацій та їхнє уповільнення перед перешкодами. Збільшення питомого об'єму металу зумовлює утворення залишкових напружень стиску. Глибина залягання напружень стиску зазвичай на 10-50% перевищує глибину шару з підвищеною твердістю.

При дослідженні було зацентровано увагу на взаємозв'язок між тепловою енергією та тепловими полями, що виникають при пластичній деформації в третинній зоні зсуву. Установлено, що вздовж довжини контакту повинен існувати принаймні один пік температури.

При ударній дії деформуючого елементу виявлено незначний нагрів до 350°C. Нагрів до 750°C не пов'язаний з кристалізацією, що не призводить до зміни фізичного стану залізо-вуглецевих сплавів (самовідпуск або розмагнічування).

Підкреслена актуальність розробки ресурсощадного процесу для підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробної техніки, зокрема лап культиватора та лемешів плуга.

Кінцевою метою досліджень стало створення процесу, який забезпечує поліпшення експлуатаційних показників лап за рахунок цілеспрямованого впливу на пластичну деформацію, твердість та мікроструктуру металу.

Доведено, що найбільш ефективним засобом є поєднання гідроімпульсного навантаження та поверхнево-пластичної деформації. Цей підхід дозволяє зменшити габаритні розміри установки, забезпечуючи раціональне розміщення на виробництві.

Результати випробувань дослідної партії лап культиваторів:

- Твердість матеріалу при ППД підвищується на 37-46%.
- Деформаційне зміцнення (за характеристикою мікротвердості) сягає 25-50%.
- Напрацювання робочих органів ґрунтообробних машин при експлуатаційних випробуваннях збільшується до 43%.

Рекомендовано проводити ППД робочих поверхонь перед початком їх використання з метою забезпечення збільшення площ оброблюваних земель.

Ключові слова: формоутворення, надійність, напружено деформований стан, відновлення, гідравлічний привід, системний підхід, математична модель, мікротвердість, стенд, структура, перехідний процес, поверхневий шар, гідроциліндр, відновлення, насос.

ANNOTATION

Telyatnik I.A. Research into deformation strengthening of working surfaces of soil tillage machines by hydropulse loading. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the educational and scientific degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 132 Materials Science (13 Mechanical Engineering) – Vinnytsia National Agrarian University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Vinnytsia, 2026.

The dissertation solves an important scientific problem related to increasing the wear resistance of the working bodies of soil-tillage agricultural machines. This was achieved through theoretical substantiation and determination of optimal design and technological parameters for strengthening the working surfaces of tillage implements by surface plastic deformation under hydraulic impulse loading.

The introduction contains a justification for the importance of the research, a clearly formulated goal, and a list of specific tasks necessary to achieve it. The novelty of the obtained scientific results, the practical value of the work, and the author's personal participation in its implementation are highlighted. Information on the validation of the results, a list of publications, and a description of the structure and overall scope of the dissertation are provided.

The purpose of the study is to increase the wear resistance of the working surfaces of soil tillage agricultural machinery bodies by surface-plastic deformation under hydraulic impulse loading. To achieve this goal, an analysis of known wear processes was conducted and the parameters and features of the application of surface plastic deformation methods to increase wear resistance were characterized. In the course of the work, a schematic diagram of a press with a hydraulic pulse drive was developed and a mathematical model of the operating cycle of a hydraulic pulse device for deformation hardening was created, and the shape change of the structure of polycrystalline materials during deformation was also investigated. In addition, an experimental stand with a hydraulic impulse drive for surface plastic deformation of parts was developed, which made it possible to experimentally establish the dependence of material hardness parameters on the operating modes of the hydraulic impulse equipment and the design parameters of the striker. The results

of the study include the implementation of production implementations and the study of the regularities of the operating modes of the hydraulic pulse load.

The object of research is the process of surface-plastic deformation of the working surfaces of the executive elements of soil tillage equipment under conditions of hydraulic impulse loading.

The subject of the study is the relationship between the parameters of the formed surface layer and the technological modes of the process of surface-plastic deformation by hydropulse loading.

The paper analyzes the features of wear of working parts of tillage machines in the conditions of modern agricultural production in Ukraine. Typical defects of the working parts of plows (shares, shelves, knives), cultivators (paws, racks) and disk harrows (disks) are presented, as well as permissible wear parameters (blunt width, toe length, back chamfer width), which are criteria for loss of performance and the need for repair or replacement.

Structural and materials science approaches aimed at increasing wear resistance are considered, in particular the use of materials from which the working bodies of soil tillage machines are made (steel 50, 65G), the importance of local strengthening of the most loaded areas to extend the service life of parts is emphasized. Analysis of scientific sources shows that issues of increasing wear resistance are mainly considered from the perspective of thermal effects on the material, while geometric wear factors remain insufficiently studied.

The scientific novelty of the obtained results lies in the fact that for the first time the regularities of the distribution of plastic deformation in the surface layer of structural steels under conditions of hydraulic impulse loading were established, which made it possible to determine the limiting depth of the riveted zone and the nature of its change depending on the energy and geometric parameters of the impact. Also, for the first time, a mathematical model of the operating cycle of a hydropulse device was developed, which provides prediction of the efficiency of the surface-plastic deformation process and determination of the energy of the deformable zone of the treated surface.

The approach to assessing the effectiveness of the surface-plastic deformation process, taking into account the energy parameters of the hydropulse impact and the

geometry of the contact interaction, has been further developed, which allows quantitatively linking the load energy with the characteristics of the deformed zone, as well as an experimental-analytical approach to studying the processes of deformation hardening, which combines model ideas with experimental data on the distribution of plastic deformation over the depth of the surface layer.

The first section is devoted to the analysis of surface plastic deformation methods as an effective technological solution for increasing the wear resistance and reliability of the working elements of soil tillage equipment. Surface plastic deformation SPD is based on the ability of a metal to withstand elastic-plastic residual deformation, which allows a high-quality surface layer to be formed without violating the integrity of the material.

During surface plastic deformation, the hardness and strength of the surface increase, and favorable residual compressive stresses are formed, which significantly reduces stress concentration and improves the fatigue strength of parts. In addition, SPD contributes to reducing surface roughness, forming a fine-grained structure, and increased resistance to corrosion.

Processing by SPD methods has significant advantages compared to other methods, including the absence of thermal defects and the ability to achieve minimum roughness parameters while maintaining the original shape of the workpiece.

The mechanism of deformation hardening, which is a consequence of elastic-plastic deformation of the surface layer of the metal during processing by plastic deformation methods, is described in detail. The process causes profound structural changes in polycrystalline materials: the metal grains change their shape, elongating and creating a deformation texture with a preferential orientation of the axes of greatest strength along the direction of deformation. This significantly changes the microstructure and causes the appearance of anisotropy properties.

The design features and types of vibration exciters for the implementation of SPD are analyzed, the effect of which is to increase the wear resistance and fatigue strength of parts due to the structural strengthening of the surface layer.

Impulse action is provided using vibration impact devices, as well as vibration systems that operate in non-stationary modes and have a generalized structural

diagram that includes an energy source, a drive, and a vibration generator. Among the vibration exciters used for deformation strengthening, the most compact and promising are hydropulse drives (HPD), classified as hydraulic systems with a pulsed nature of action.

Hydropulse actuators (HPA), the main element of which is a pressure pulse generator (PGP), provide significant forces (up to 100 kN) in a compact design, relatively low operating pressure (up to 10 MPa), and the ability to parametrically adjust operating modes. Further development of these systems is associated with the use of combined drives, in particular electro-hydraulic valves, which combine the high energy density of hydraulics with the ability to programmatically control the frequency characteristics of electromagnetic systems, providing flexible regulation without loss of the required power.

The second section defines the key requirements for a hydraulic impulse drive designed for vibration and impact machines. The main requirements are to minimize the total volume of the pressure cavity to ensure maximum rigidity of the hydraulic system.

The design of the HPD must ensure stability of the amplitude-frequency characteristic even when the working fluid is heated, and also be easy to operate and maintain.

The choice of pump type depends on the nominal operating pressure p_1 : gear (NSh) for $p_1 \leq 12.5$ MPa, and plunger with unloading devices for $p_1 \geq 12.5$ MPa.

For vibration amplitudes ≥ 2 mm, cyclic spring accumulators with accumulation pressure regulators are recommended, which minimally change the volume of the pressure cavity and maintain hydraulic rigidity.

The operating cycle of the actuator was investigated, which is conventionally divided into stages: pressure build-up, signal input to the valve, movement of the spool to the “working” position, the next pulse to the valve, movement of the spool to the “closed” position. The use of a control unit and pressure and displacement sensors allows you to adjust operating parameters remotely and in real time.

A schematic diagram of a laboratory stand has been developed, which includes a press with electrohydraulic control for SPD, which includes a personal computer (PC), an analog-to-digital converter (ADC), a control unit (CU), an

electrohydraulic pulsator valve, hydraulic cylinders, pressure and displacement sensors, a vibrating plate, and a hydraulic station.

A basic hydrokinematic diagram of a prototype of a hydropulse device for deformation hardening of parts has been developed. The device is used on a stand with various forms of working bodies of soil tillage equipment.

Parameters are recorded during experiments using the oscillography method. The influence of the geometric shape of the striker on the SPD process was analyzed. Plastic deformation is an irreversible change that depends on the impact energy, material properties, and shape of the impactor.

Studying the deformation of strikers is important for predicting service life, optimizing material selection, and developing new design solutions. The degree of deformation of the metal surface during the impact of a spherical impactor was determined, and the role of dislocation clusters in the strengthening of metals during deformation was noted.

The main factor for design is the hardening energy, which is advisable to provide by combining power links with elastic elements of the PGP and the striker.

The presented conditional cyclogram of the working cycle of the device illustrates the change in pressure in the pressure cavity and the movement of the seat and the piston-hammer for the case of maximum pulse frequency.

For the mathematical description of the dynamics of the working cycle, which is combined into two periods (forward and reverse), an "elastic-concentrated model" of the energy carrier is used. In this model, the hydraulic drive link is represented by a Kelvin–Voigt body (viscoelastic model).

In addition, the work determines the gear ratio, the stiffness of the inertialess elastic element, the viscous resistance force of the dissipative element, and also establishes the relationship between the pressure of the energy carrier and the deformation of the hydraulic link.

The third section substantiates the feasibility of using deformation strengthening for the working parts of soil tillage equipment, in particular plowshares and cultivator paws. It is shown that processing by surface plastic deformation methods can be used both to restore geometric parameters and to strengthen the surface layer. At the same time, plastic deformation of polycrystalline

metals is accompanied by a restructuring of their microstructure, which manifests itself in a change in the shape and orientation of grains and the formation of a deformation texture. As a result of SPD treatment, a favorable stress-strain and physical state of the surface layer is formed, characterized by increased hardness, formation of residual compressive stresses, and reduction of surface microroughness.

Experimental studies have been conducted on the restoration of cutting edges of working elements of soil tillage equipment using the method of plastic deformation.

During the experiments, the following parameters were varied: hydraulic pump flow rate – 0 - $1.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$; frequency of the input signal to the electro-hydraulic valve – 0 - 50 Hz with a step of 2.5 Hz;

The design and technical parameters of the prototype press are given. Among the key parameters: cross-sectional area of the plunger of the vertical hydraulic cylinder: $7.85 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$; volume of the pressure cavity of the hydraulic system of the drive W: $9.05 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$; supply of the pump of the drive of the vertical hydraulic cylinder Q_H : $1.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$; maximum force of the drive of the vertical hydraulic cylinder: $23 \cdot 10^4 \text{ H}$; maximum working pressure in the hydraulic system: 14 MPa. mass of the executive link (reduced): 300 kg.

Further research was aimed at analyzing the design solutions of press equipment for implementing surface plastic deformation using a hydropulse drive, which ensures the formation of shock and vibration-impact loads with controlled parameters. It is shown that the efficiency of press equipment is determined primarily by the type of drive, which shapes the nature of the load and energy parameters of the SPD process.

In the shock loading mode, it has been established that the sequential action of repeated force pulses leads to the accumulation of plastic deformation in cases where a single pulse causes only an elastic response of the material. For steel 65G, the zone of plastic deformation propagation was experimentally determined, in which the plastic deformation coefficient reaches a maximum value on the impactor contact surface ($\varepsilon_{\max} = 2.7$) and decreases with depth to $\varepsilon_{\min} = 0.1$. The maximum depth of the deformed surface layer was fixed at $h \approx 1.5 \text{ mm}$.

Analysis of the conditions for the formation of the surface layer during SPD showed that the determining parameters of the process are the ratio of elastic and plastic deformations, the area of contact interaction, the magnitude of the applied force, and the level of contact stresses. The degree of plastic deformation was estimated by the relative parameter $\varepsilon = d/D$, which for structural steels is within the range of 0.3...0.7. It has been established that the martensitic structure is characterized by the greatest depth of the hardened zone, while the sorbitic structure provides the minimum depth and intensity of hardening. It is shown that the depth of the riveted zone increases with increasing deformation force and, with the same diameters of impressions during impact and static pressing, is practically the same. The optimal impact energy range for structural steels is 15–80 J.

The fourth section is devoted to testing the hydraulic impulse drive and defines the goal of production research of a press with a hydraulic impulse drive.

The real patterns of changes in the operating parameters of the press for the pulse type of load, the adequacy of operation with parametric settings and a given law of change in the fluid flow have been established.

The adequacy of the developed dynamic and mathematical models of the HPD was checked.

The research tasks were outlined, which included establishing the correspondence between the specified and experimental parameters of vibration loading (amplitude, frequency), the law of change in the frequency of pressure pulses, as well as the dependence of the amplitude and frequency of impacts when sending signals to the electro-hydraulic valve. The research was carried out on the basis of a prototype of the IP-16 press. The research methodology involved performing sequential stages: from preliminary sample preparation and experimental planning to recording dynamic parameters, further processing of results, and construction of graphical relationships.

To ensure the reliability of experimental data, formulas were used to determine the required number of measurements and calculate the root mean square error, which includes systematic, instrumental, methodological, and random errors of the measuring chain.

The production study was conducted in several stages to obtain data on parametric and adjustable control of the vibrating press. When testing the parametric control mode, it was found that the control system could not operate adequately due to transients in the pressure hydraulic line.

The obtained research results showed that using this control system, it is possible to obtain vibrations on the actuator in the range of 1 to 60 Hz with an amplitude of oscillations of up to 4 mm. The dependences of the optimal mode were established, which were determined by the maximum pump flow and the optimal range for obtaining a pulse type of load of 20-35 Hz with a vibration amplitude of up to 2 mm.

Microstructural analysis of subsurface deformation during hardfacing showed the existence of material resistance layers associated with large lattice distortion due to metal plasticity.

The study of the mechanism of strain hardening (for steel 65G) identifies three consecutive phases:

Phase I (Simple Glide): It is characterized by a low strengthening rate. At this stage, the movement of dislocations occurs almost exclusively in one active slip system.

Phase II (Complex Gliding): There is an intensive increase in the strengthening coefficient. This is due to a sharp increase in the density of dislocations, which leads to an increase in the number of their interactions and intersections.

Phase III (Dynamic Equilibrium): The strengthening coefficient decreases. The reason for this is the massive transverse sliding of dislocations and the processes of dynamic return (recovery).

For the purpose of SPD, impactors with diameters of 4, 6, 8, and 10 mm were investigated. It was determined that the optimal diameter is 10 mm, since it allows creating stressed zones without a significant impact on the deformation zone.

The main reason for the strengthening is the avalanche-like development of dislocations and their deceleration in front of obstacles. The increase in the specific volume of the metal causes the formation of residual compressive stresses. The depth

of compressive stresses is usually 10-50% greater than the depth of the layer with increased hardness.

The study focused on the relationship between thermal energy and thermal fields arising from plastic deformation in the tertiary shear zone. It is established that there must be at least one temperature peak along the length of the contact.

During the impact action of the deforming element, a slight heating up to 350°C was detected. Heating up to 750°C is not associated with crystallization, which does not lead to a change in the physical state of iron-carbon alloys (self-tempering or demagnetization).

The relevance of developing a resource-saving process to increase the wear resistance of the working parts of soil tillage equipment, in particular, cultivator tines and plow shares, is emphasized.

The ultimate goal of the research was to create a process that improves the performance of the paws by targeting plastic deformation, hardness, and microstructure of the metal.

It has been proven that the most effective means is a combination of hydraulic impulse loading and surface plastic deformation. This approach allows you to reduce the overall dimensions of the installation, ensuring rational placement in production.

Test results of the experimental batch of cultivator tines:

- The hardness of the material during SPD increases by 37-46%.
- Strain hardening (according to the microhardness characteristic) reaches 25-50%.

The service life of the working bodies of soil tillage machines during operational tests increases to 43%.

It is recommended to conduct a SPD of working surfaces before starting their use in order to ensure an increase in the area of cultivated land.

Keywords: forming, reliability, stressed-deformed state, recovery, hydraulic drive, system approach, mathematical model, microhardness, bench, structure, transient process, surface layer, hydraulic cylinder, recovery, pump.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у баз даних Web of Science Core Collection та/або Scopus

1. Veselovska N., Sivak R., Paladiychuk Y., Bandura V., **Telyatnik I.**, Bohatiuk M., Savkiv V., Edl M. Kinematic Characteristics of Deformed Porous Structures. *Journal of Engineering Sciences*. 2024. Vol. 11. № 1. pp. 44–53. [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).d6](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).d6). (1 друк. арк., особистий внесок аспіранта: вдосконалено експериментальні та обчислювальні методи вивчення напружено-деформованого стану під час пластичної деформації пористих тіл – 0,2 друк. арк.).

Статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б», включених до міжнародної наукометричної бази даних (Index Copernicus)

2. Паладійчук Ю.Б., **Телятник І.А.** Типи і конструкції віброзбуджувачів сучасного машинобудування. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 4 (107). С. 26-35. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-4-4. URL: <http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/December2022/RCPdoCAOCaLam9zAYAZG.pdf>. (0,77 друк. арк., особистий внесок аспіранта: проаналізовано типи та конструкції відомого вібраційного обладнання та віброзбуджувачів, що застосовуються у машинобудуванні – 0,19 друк. арк.).

3. Веселовська Н.Р., Паладійчук Ю.Б., **Телятник І.А.** Дослідження мікротвердості поверхні циліндричної деталі при деформаційному протягуванні. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 3 (118). С. 31-42. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-3-5 URL: <http://tetapk.vsau.org/storage/articles/December2022/STrbMph4smnjOzjL0Wk.pdf>. (1,08 друк. арк., особистий внесок аспіранта: здійснено аналіз переваг та недоліків найбільш розповсюджених процесів отримання круглих отворів у порожнистих заготовках та деталях – 0,27 друк. арк.).

4. Телятник І.А. Дослідження поверхневої пластичної деформації при гідроімпульсному впливі. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 1 (120).

C.110-119. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-1-13 URL: <http://tetapk.vsau.org/storage/articles/May2023/HCh4gxVEZLwkRrnU0kkr.pdf>. (0,88 друк. арк.)

5. Паладійчук Ю.Б., Телятник І.А. Дослідження теплового циклу на поверхні заготовки внаслідок пластичної деформації при механічній обробці. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 2 (109). С. 72-84. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-2-9 URL: <http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/October2023/6ugL0vI2uU2b9pE2Whdx.pdf>. (1,25 друк. арк., особистий внесок аспіранта: установлено, що підповерхнева тепла зона пов'язана з деформацією, спричиненою різанням, оскільки вона поєднує інформацію про величину теплового поля та швидкість процесу – 0,625 друк. арк.).

6. Paladiychuk Y., Telyatnik I., Kubai M. Research of the vibratory formation of the compassion of powder materials by hydro-impulse loading. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 3 (122). С. 35-42. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-3-4 URL: <http://tetapk.vsau.org/storage/articles/December2023/YyB8gjAl8TX8IwbnreIU.pdf>. (0,87 друк. арк., особистий внесок аспіранта: описано основні технологічні процеси вібраційного та віброударного впливу на матеріали – 0,304 друк. арк.).

7. Паладійчук Ю.Б., Телятник І.А. Алгоритм експериментального дослідження гідроімпульсного пристрою для зміцнення деталей деформацією. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 4 (123). С. 31-42. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-4-4 URL: <http://tetapk.vsau.org/storage/articles/January2024/Go0f2ciQxjm4yh6q73Nk.pdf>. (1 друк. арк., особистий внесок аспіранта: досліджено вплив регулювання параметрів генератора імпульсів тиску на характеристики пристрою – 0,5 друк. арк.).

8. Paladiychuk Y., Telyatnik I., Kubai M. Metallographic study of changes in the structure of a deformed metal layer during water-pulse smoothing. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2024. № 4 (127). С. 35-42. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-4-1 URL: <http://tetapk.vsau.org/storage/articles/December2024/o77xpIp9UfjoNC0EaHOu.pdf>. (1,5 друк. арк., особистий внесок аспіранта: досліджено взаємодію пружної та пластичної деформації, механізми деформаційного зміцнення та ефекти накопичення дислокацій – 0,525 друк. арк.).

Інші наукові видання інших держав, що засвідчують апробацію результатів дисертаційної роботи

9. Paladiychuk Y., Telyatnik I. Increasing the efficiency of choosing a hydraulic impulse drive with programmable control. *Agricultural engineering*. 2023. Vol. 55. P. 30-43. <https://doi.org/10.15544/ageng.2023.55.4>. (1,2 друк. арк., особистий внесок аспіранта: обґрунтовано схеми та методи проведення вібраційного формування порошкових матеріалів – 0,6 друк. арк.).

Матеріали конференцій

10. Паладійчук Ю.Б., Телятник І.А. Сучасні ресурсозберігаючі технології виробництва та відновлення виконавчих органів сільськогосподарських машин. *Сучасні проблеми землеробської механіки присвячена. 122-річчю з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка: матеріали XXIII Міжнар. наук. конф., 16-18 жовтня 2022 р. м. Київ-Житомир, 2022. С. 188-190. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/zbirnik_konf_vasilenko_2022.pdf (0,16 друк. арк., особистий внесок аспіранта: досліджено, процеси які базуються на деформуючому та різальному протягуванні – 0,08 друк. арк.).*

11. Телятник І.А. Особливості механіки протягування внутрішніх поверхонь при виготовленні та відновленні порожнистих деталей сільськогосподарської техніки. *Сучасні проблеми землеробської механіки присвячена. 122-річчю з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка: матеріали XXIII Міжнар. наук. конф., 16-18 жовтня 2022 р. м. Київ-Житомир, 2022. С. 191-193. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/zbirnik_konf_vasilenko_2022.pdf. (0,12 друк. арк.).*

12. Телятник І.А. Зміцнення структури матеріалів поверхневою пластичною деформацією. *Scientific Research and Innovation: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Internet Conference. 3-4 April 2023. Dnipro, 2023. С. 361-363. URL: <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2023/04/Conference-Proceedings-April-3-4-2023-3.pdf>. (0,20 друк. арк.).*

13. Телятник І.А. Обґрунтування дослідження ударно-вібраційного впливу обробки матеріалів гідравлічним імпульсним пристроєм. *Теоретичні і*

експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування: матеріали конференції (тези) IX міжнародної науково–практичної конференції. 30 травня – 01 червня 2023 р. Луцьк: ЛНТУ. 2023. С. 57-60. URL: <https://termm.lntu.edu.ua/index/conference-program>.(0,17 друк.арк.).

14. Телятник І.А. Обґрунтування дослідження ударно-вібраційного впливу обробки матеріалів гідравлічним імпульсним пристроєм. *Перспективи розвитку машинобудування та транспорту: матеріали конференції (тези) III міжнародної науково-технічної конференції 01 – 03 червня 2023 р. Вінниця: ВНТУ. 2023. С. 329-331. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt/2023/paper/viewFile/18348/15155>. (0,16 друк. арк.).*

15. Паладійчук Ю.Б., **Телятник І.А.** Мікроструктурний аналіз підповерхневої деформації, викликаной різанням, в результаті різних комбінацій теплових і механічних впливів. *Сучасні проблеми землеробської механіки: збірник тез доповідей XXIV міжнародної наукової конференції присвяченій 123-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 125-й річниці з дня заснування кафедри сільськогосподарських машин та системотехніки імені академіка П. М. Василенка, 17 – 19 жовтня 2023 р. Київ: НУБіП. 2023. С. 331-334. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u218/zbirnik_konf10_fin.pdf (0,16 друк. арк., особистий внесок аспіранта: визначено серії вузьких слідів деформації на обробленій поверхні, які поширюються вглиб матеріалу, спотворюючи решітку через пластичну деформацію, спричинену різанням – 0,08 друк. арк.).*

16. Телятник І.А. Вплив теплового поля на межі контактування інструменту-заготовки при механічній обробці. *Сучасні проблеми землеробської механіки: збірник тез доповідей XXIV міжнародної наукової конференції присвяченій 123-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 125-й річниці з дня заснування кафедри сільськогосподарських машин та системотехніки імені академіка П. М. Василенка, 17 – 19 жовтня 2023 р. Київ: НУБіП. 2023. С. 336-339. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u218/zbirnik_konf10_fin.pdf. (0,18 друк. арк.).*

17. Паладійчук Ю.Б., **Телятник І.А.** Основи гідроімпульсного привода в вібраційному обладнанні: швидкість передачі імпульсу навантаження в середовищі заготовки. *Modern Movement of Science: Proceedings of the 15th International Scientific and Practical Internet Conference 19 – 20 October, 2023. Dnipro. 2023. С. 404-407. URL:*

<http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2023/10/Conference-Proceedings-October-19-20-2023-1.pdf>. (0,20 друк. арк., особистий внесок аспіранта: встановлено, що якщо початковий імпульс викликає лише пружну деформацію заготовки, то під впливом наступних імпульсів сили пластична деформація заготовки посилюється – 0,10 друк. арк.).

18. Телятник І.А. Аналіз теплового поля та цілісності поверхні в умовах різання високовуглецевих сталей. *Nuclear Potential and Possible Threats to the Modern World: Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Internet Conference*. 26 – 27 October, 2023. Dnipro. 2023. С. 72-75. URL: <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2023/11/Conference-Proceedings-October-26-27-2023-1.pdf>. (0,26 друк. арк.).

19. Телятник І.А. Інтенсифікація поверхневого пластичного деформування металу при гідроімпульсному впливі. *Achievements of 21st Century Scientific Community: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Internet Conference*, 16 – 17 September, 2024. Dnipro. 2024. С. 253-256. URL: <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2024/09/Conference-roceedings-September-16-17-2024.pdf>. (0,21 друк. арк.).

20. Телятник І.А. Дослідження впливу поверхневої пластичної деформації на мікроструктурні зміни та механічні властивості сплавів. *Modern Movement of Science: Proceedings of the 16th International Scientific and Practical Internet Conference*, 14 – 15 October, 2024. Dnipro. 2024. С. 371-374. URL: <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2024/10/Conference-Proceedings-October-14-15-2024.pdf> (0,24 друк. арк.).

21. Телятник І.А. Аналіз механізмів деформації та мікротвердості при поверхнево-пластичній деформації. *Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу*. Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (21 листопада 2025 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. 21 листопада, 2025. Дніпро. ДДАЕУ, 2025. С.119-121. (0,11 друк. арк.).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	28
ВСТУП.....	29
РОЗДІЛ. 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН.....	35
1.1. Аналіз зношення робочих органів ґрунтообробних машин.....	35
1.2. Методи підвищення зносостійкості робочих органів сільськогосподарських машин.....	46
1.3. Вплив поверхнево-пластичного деформування на зміцнення робочих органів ґрунтообробної техніки.....	49
1.4. Механізми деформаційного наклепу та їх використання в технології зміцнення.....	55
1.5. Конструктивні особливості віброзбуджувачів для забезпечення поверхнево-пластичної деформації.....	61
1.6. Висновки до 1 розділу	72
2. КОМПОНУВАННЯ ТА КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ ГІДРОІМПУЛЬСНОГО ПРИВОДУ	74
2.1. Функціонування та вимоги до гідроімппульсного приводу	74
2.2. Структурна схема та принцип дії пресу для реалізації поверхнево- пластичної деформації.....	79
2.3. Конструктивні особливості гідроімппульсного пристрою для зміцнення деталей сільськогосподарських машин деформацією.....	85
2.4. Вплив геометричної форми ударника на формозміну локальних зон зміцнення при поверхнево-пластичній деформації.....	89
2.5. Теоретичне обґрунтування параметрів гідроімппульсного пристрою для деформаційного зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин	95
2.6. Висновки до 2 розділу	105
3. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ГІДРОІМПУЛЬСНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ.....	106

3.1. Механіка деформаційного зміцнення деталі при застосуванні гідроімпульсного пристрою	106
3.2. Дослідження закономірностей робочих режимів гідроімпульсного приводу	111
3.3. Поверхнева пластична деформація при гідроімпульсному впливі.....	114
3.4. Визначення поверхневого пластичного деформування в поверхневому шарі під час обробки деталі	121
3.5. Висновки з 3 розділу	128
РОЗДІЛ 4. ВИРОБНИЧЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОІМПУЛЬСНОГО ПРИВОДУ	129
4.1. Дослідно-виробничі випробування гідроімпульсного приводу	129
4.2. Виробничі дослідження закономірностей робочих режимів гідроімпульсного приводу	133
4.3. Механізм деформаційного зміцнення при динамічному поверхнево-пластичному деформуванні.....	136
4.4. Дослідження теплового циклу на поверхні заготовки внаслідок пластичної деформації при механічній обробці	150
4.5. Дослідно-виробничі випробування ресурсощадного процесу відновлення лап культиватора	153
4.6. Висновки до 4 розділу	156
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	158
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	160
ДОДАТКИ.....	174

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ППД – поверхнева пластична деформація.

σ_b – межа міцності.

h – глибина.

Δ – залишкової деформації.

ВМ – вібраційна машина.

ВУМ – віброударна машина.

ВЗ – віброзміцнення.

ВН – вібронаклеп.

ППШ – пульсуюче шліфування.

ГІТ – генератор імпульсів тиску.

ГІП – гідроімпульсний привід.

φ – кут хвостовика.

ψ – кут розхилу крил.

B – ширина захвату лапи.

ІП – інерційний прес.

σ – напруга вдавлювання.

σ_T – межа текучості.

F – сила удару.

ε – ступінь пластичної деформації.

E_{Π} – потенційна енергія ударника.

E_y – енергію удару.

ρ_d – густина дислокацій.

ПК – персонального комп'ютера.

АЦП – аналоговоцифровий перетворювач.

БК – блок керування.

ЕК – електрогідравлічний клапан.

ЕМЕК – електромагніт електрогідравлічного клапана.

E_k – кінетична енергія.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні тенденції розвитку агропромислового виробництва вимагають від підприємств, що працюють у галузі сільськогосподарського машинобудування, вирішення завдання щодо інтеграції таких технологій та рішень, які б сприяли як підвищенню загальної надійності компонентів і готової продукції, так і зниженню її собівартості. Ключові показники надійності машинних деталей — міцність, зносостійкість, опір вібрації та термічна стійкість — є визначальними. Досягнення цих критеріїв реалізується на етапі виготовлення через ретельний вибір матеріалу та застосування різних методів покращення властивостей. Серед таких методів — термічна обробка, а також обробка поверхні та зон підвищеної концентрації напружень фізичними способами для підвищення міцності та зносостійкості.

Для підвищення втомної довговічності та зносостійкості деталей машин застосовують поверхневе зміцнення шляхом наклепу в робочих зонах, особливо в місцях локалізації напружень.

Більшість технічних сплавів мають полікристалічну будову. На відміну від монокристалів, деформація полікристалічних матеріалів одразу починається з множинного ковзання в різних системах, не маючи стадії легкого ковзання. Цей процес супроводжується згинами та поворотами площин ковзання. Навіть при невеликій загальній деформації (близько 1%) зміна структури є неоднорідною через відмінності в орієнтації окремих зерен відносно зовнішнього навантаження. Проте зі зростанням рівня деформації різниця між зернами поступово нівелюється. Зміни в мікроструктурі включають витягування зерен у напрямку пластичної течії, а також збільшення щільності кристалічних дефектів у ґратці.

Метод поверхневої пластичної деформації (ППД) — це процес деформаційного зміцнення зовнішнього шару, що індукує дефекти кристалічної ґратки (лінійні, гвинтові дислокації та точкові дефекти). Наслідком цього є значне підвищення стійкості оброблених шарів до втоми та зносу.

ППД може бути реалізована за допомогою різних механізмів і пристроїв, що використовують механічний, пневматичний або гідравлічний привід. Серед

них гідравлічні системи часто виявляються найбільш компактними завдяки перевагам гідроприводу. Особлива перевага надається гідроімпульсному приводу, як відносно новітньому рішенню. Він дозволяє створювати малогабаритні пристрої для зміцнення, які можуть бути інтегровані безпосередньо у робочу зону металорізальних верстатів.

Метою дослідження є підвищення зносостійкості робочих поверхонь органів ґрунтообробних сільськогосподарських машин поверхнево-пластичною деформацією гідроімпульсним навантаженням.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані *такі завдання дослідження*:

1. Проаналізувати відомі процеси зношування робочих органів ґрунтообробних сільськогосподарських машин та охарактеризувати параметри, та особливості застосування методів поверхнево-пластичної деформації для підвищення зносостійкості.

2. Розробити принципову схему пресу з гідроімпульсним приводом.

3. Розробити математичну модель циклу роботи гідроімпульсного пристрою для деформаційного зміцнення та дослідити формозміну структури полікристалічних матеріалів при деформації.

4. Розробити експериментальний стенд з гідроімпульсним приводом для поверхнево-пластичного деформування деталей та експериментально встановити залежність параметрів твердості матеріалу від режимів роботи гідроімпульсного обладнання і конструктивних параметрів ударника.

5. Виконати виробничі дослідження та впровадження закономірностей робочих режимів гідроімпульсного навантаження.

Об'єкт дослідження – процес поверхнево-пластичного деформування робочих поверхонь виконавчих елементів ґрунтообробної техніки за умов гідроімпульсного навантаження.

Предмет дослідження – взаємозв'язок між параметрами сформованого поверхневого шару та технологічними режимами процесу поверхнево-пластичного деформування гідроімпульсним навантаженням.

Методи дослідження. У роботі застосовано комплекс теоретичних та експериментальних методів дослідження. Теоретичні дослідження базуються на

положеннях матеріалознавства та теорії пластичної деформації, які використовувалися для аналізу процесів поверхнево-пластичної деформації при гідроімпульсному навантаженні.

Експериментальні дослідження виконано з використанням спеціально розробленого гідроімпульсного обладнання, що забезпечувало реалізацію ударного навантаження з керованими параметрами. Реєстрацію динамічних параметрів процесу здійснювали із застосуванням сучасних вимірювальних засобів, що дозволило визначити характер зміни навантаження та відгук матеріалу під час деформаційного зміцнення.

Оцінювання ефективності поверхнево-пластичної деформації проводили за результатами аналізу змін фізико-механічних властивостей і стану поверхневого шару металів. Отримані експериментальні дані використовували для узагальнення закономірностей впливу параметрів гідроімпульсного навантаження на процес деформаційного зміцнення.

Наукова новизна полягає у:

Вперше:

- встановлено закономірності розподілу пластичної деформації у поверхневому шарі конструкційних сталей за умов гідроімпульсного навантаження, що дозволило визначити граничну глибину наклепаної зони та характер її зміни залежно від енергетичних і геометричних параметрів ударного впливу;
- розроблено математичну модель циклу роботи гідроімпульсного пристрою, що забезпечує прогнозування ефективності процесу поверхнево-пластичної деформації та визначення енергії деформованої зони оброблювальної поверхні;

Отримали подальший розвиток:

- підхід до оцінювання ефективності процесу поверхнево-пластичної деформації за врахування енергетичних параметрів гідроімпульсного удару та геометрії контактної взаємодії, що дозволяє кількісно пов'язати енергію навантаження з характеристиками деформованої зони.

- експериментально-аналітичний підхід до дослідження процесів деформаційного зміцнення, який поєднує модельні уявлення з експериментальними даними про розподіл пластичної деформації за глибиною поверхневого шару.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дослідження, що становлять основу дисертації, проведено у Вінницькому національному аграрному університеті (ВНАУ) 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.), із залученням дисертантки.

Практична значимість роботи: Результати теоретичних і експериментальних досліджень процесу поверхнево-пластичної деформації робочих органів ґрунтообробної техніки за умов гідроімпульсного навантаження використовуються у навчальному процесі Вінницького національного аграрного університету при викладанні дисциплін інженерно-технологічного спрямування, зокрема «Надійність і ремонт машин», «Трактори і автомобілі», «Сільськогосподарські машини» (довідка № 01.1-60-1590 від 10.12.2025 р. додаток Д).

На основі отриманих результатів і розроблених технічних рішень конструкторська та технологічна документація гідроімпульсного пристрою передана підприємству ТОВ «Агромаш-Калина» (м. Калинівка, Вінницька область) для виготовлення дослідних зразків і проведення подальших виробничих випробувань з перспективою впровадження технології деформаційного зміцнення у серійне виробництво, (акт про впровадження/використання результатів науково-технічної роботи від 19.11.2025 р. додаток Е).

Окремі результати дисертаційної роботи, зокрема рекомендації щодо вибору режимних і енергетичних параметрів гідроімпульсного навантаження, а також методичні підходи до оцінювання ефективності деформаційного

зміцнення, використані у виробничій діяльності факультету ВНАУ Паладійчука Юрія Богдановича, з однієї сторони, і представник ТОВ «АБА «АСТРА» (с. Якушинці, Вінницька область) під час виконання робіт із відновлення та підвищення зносостійкості деталей машин сільськогосподарського призначення (акт про виробничу перевірку від 10.11.2025 р. додаток Ж).

Застосування запропонованих рішень дозволило підвищити стабільність технологічних параметрів обробки та забезпечити більш прогнозований ресурс відновлених деталей.

Особистий внесок здобувача. Самостійне отримання автором комплексу теоретичних та експериментальних результатів лягло в основу положень, що виносяться на захист. Спільна робота з науковим керівником та співавторами публікацій стосувалася формулювання завдань та аналізу отриманих даних.

Апробація роботи. Основні положення та результати роботи успішно пройшли апробацію на науково-технічних конференціях та отримали позитивні рецензії від провідних фахівців (додаток К): XXIII Міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми землеробської механіки» присвячена 122-річчю з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка. Київ-Житомир. 16 – 18 жовтня 2022 р; Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні процеси агропромислової інженерії в умовах сталого розвитку: проблеми та перспективи». Вінниця. 20 – 21 жовтня 2022 року; II Міжнародна науково-практична інтернет-конференції «Scientific research and innovation». Дніпро. 03-04 квітня 2023 року; IX Міжнародна науково-практична конференція «Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування». Луцьк. 30 травня – 01 червня 2023 року; III Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту». Вінниця. 01 – 03 червня 2023 року; XXIV Міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми землеробської механіки» присвячена 123-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка і 125-річчю з дня заснування кафедри сільськогосподарських машин та системотехніки імені академіка П. М. Василенка. Київ - Голосієво. 17 – 19 жовтня 2023 р; XV Міжнародна

науково-практична інтернет-конференції «Modern Movement of Science». Дніпро. 19 – 20 жовтня 2023 року; Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи агропромислової інженерії у контексті євроінтеграції». Вінниця. 19-20 жовтня 2023 року; I Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Nuclear Potential and Possible Threats to the Modern World». Дніпро. 26 – 27 жовтня 2023 року; II Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Achievements of 21st Century Scientific Community». Дніпро. 16 – 17 вересня 2024 року; XVI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Modern Movement of Science». Дніпро. 14 – 15 жовтня 2024 року; Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи агропромислової інженерії в контексті глобальних викликів». Вінниця. 17-18 жовтня 2024 р; Всеукраїнська науково-практична конференція «Сталий розвиток України в умовах європейської інтеграції: сучасний стан, шлях відновлення та перспективи». Вінниця. 15-16 травня 2025 р; Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи агропромислової інженерії: проблеми та перспективи». Вінниця. 30-31 жовтня 2025 року.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 21 наукових працях, представлених у додатку Л, 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.

Обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків та списку використаних джерел і додатків, що включає 189 сторінок, у тому числі додатків на 15 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 125 сторінок, містить 66 рисунків, 9 таблиці. Список використаних джерел нараховує 116 найменувань на 13 сторінках.

РОЗДІЛ. 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

1.1. Аналіз зношення робочих органів ґрунтообробних машин

У сучасному сільськогосподарському виробництві України активно застосовується ґрунтообробна техніка вітчизняного та іноземного виробництва. Практичний досвід експлуатації закордонних машин підтверджує їхні переваги, зокрема вищу надійність і довговічність робочих органів порівняно з вітчизняними аналогами. Це особливо помітно в умовах інтенсивної експлуатації, що відображається в наукових працях [1,7,12].

Робочі органи ґрунтообробних машин функціонують у складних умовах, зазнаючи значних механічних навантажень і абразивного впливу часток ґрунту. Ступінь їх зношування безпосередньо залежить від кількісного вмісту твердих фракцій у ґрунті, зокрема часток розміром понад 0,01 мм. Найбільш інтенсивне зношування спостерігаємо під час роботи на піщано-кам'янистих ґрунтах, де ресурс лемеша може становити лише 1050–1250 гектарів. Водночас найменша швидкість зношування характерна для чорноземних і глинистих ґрунтів, де цей показник досягає 1610–1840 гектарів на леміш.

У сільському господарстві деталі машин піддаються впливу трьох основних видів зношування: абразивне, адгезійне та втомлювальне. Комплексний вплив цих факторів зумовлює необхідність удосконалення матеріалів і конструкційних рішень для підвищення зносостійкості робочих органів сільськогосподарської техніки.

Різні види зношування чинять неоднаковий вплив на втрату працездатності деталей сільськогосподарських машин. Найбільшу частку серед них займає абразивне зношування, яке становить понад 60% від загального обсягу зношення. Проте такий розподіл є орієнтовним, оскільки в реальних умовах експлуатації в зоні фрикційного контакту одночасно діє кілька механізмів зношування, що спричиняє комбінований вплив на робочі поверхні [2,3,4].

Характер та інтенсивність зношування робочих органів значною мірою залежать від типу ґрунту. Наприклад, на глинистих і чорноземних ґрунтах спостерігається швидке затуплення і стирання робочої кромки леза через високий рівень щільності та вологості таких ґрунтів. Натомість при роботі на піщаних і піщано-кам'янистих ґрунтах кромка леза залишається більш загостреною, але зношення відбувається переважно по товщині контактної поверхні, що пов'язано з абразивною дією жорстких мінеральних часток [4,6,7].

Суттєвий вплив на інтенсивність зношування чинить нерівномірність розподілу тиску ґрунту на різні ділянки робочого органа. Зокрема, питоме навантаження на лезо лемеша зростає в напрямку до його носка, що призводить до значно більшої інтенсивності зношування цієї ділянки (рис. 1.1). Таку закономірність спостерігаємо як за шириною леза під час роботи на важких ґрунтах (чорноземи, глинисті ґрунти), так і за товщиною при обробі легких, абразивно активних ґрунтів, таких як піщані.

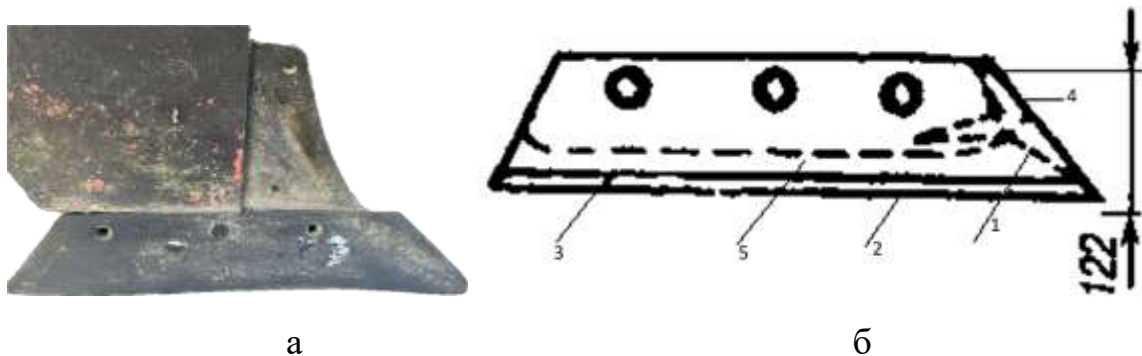


Рисунок 1.1 – Форма леза лемеша при експлуатації: а) фото лемеша; б) конструкція лемеша: 1) носок; 2) лезо; 3-5) критичні зони зношування

Джерело: [6]

Крім того, на процеси зношування впливають такі фактори: швидкість руху агрегатів, глибина обробітку ґрунту, вологість, а також матеріальні властивості робочих органів (твердість, зносостійкість, теплова обробка тощо). Оптимізація конструктивних параметрів і вибір матеріалів з підвищеною зносостійкістю дозволяють значно знизити інтенсивність зношування та підвищити загальну ефективність роботи сільськогосподарської техніки.

Однією з основних ознак несправності ґрунтообробних машин є збільшення тягового опору, що виникає внаслідок затуплення різальних кромek робочих органів, а також деформаційних змін, таких як перекіс або прогин несучих елементів конструкції. Такі дефекти призводять до зниження стабільності руху машини під час обробки ґрунту. Зокрема, спостерігаємо тенденція до заглиблення або до виглиблення робочих органів, що супроводжується відхиленням від прямолінійної траєкторії руху [1,3,6].

У плугів найбільш інтенсивному зношуванню піддаються такі робочі елементи, як лемеші, полиці, ножі та деталі ґрунтопоглиблювачів (рис. 1.2), а також колеса, осі й механізми автоматичного регулювання. Ці компоненти зазнають значних механічних навантажень і абразивного впливу ґрунту, що призводить до поступової втрати їхніх експлуатаційних характеристик.



Рисунок 1.2 – Елементи робочих органів плугів, які піддаються інтенсивному зношуванню

Джерело: [4]

Лемеші передплужників зазвичай зношуються переважно по товщині до 4–6 мм, що робить їх відновлення економічно недоцільним.

Полиці плугів зазнають найбільш інтенсивного зношування у двох основних зонах: у зоні грудинки, яка сприймає значне навантаження, відділяючи ґрунт від стінки борозни та змінюючи напрямок його руху, і в зоні перевертання ґрунту, де скиба зазнає активного обертання, створюючи додатковий абразивний

вплив. Саме ці ділянки піддаються найбільшому механічному навантаженню, що призводить до поступової втрати металу [4,7,12].

Результати досліджень, спрямованих на визначення зон зношування, їх характеру та інтенсивності, стали основою для обґрунтування раціональних методів локального зміцнення. Під час розробки технологій зміцнення враховуються геометричні особливості деталей, їхні розміри та конфігурація, що дозволяє точно визначити критичні ділянки для підвищення зносостійкості.

Крім того, беремо до уваги умови експлуатації та характер навантажень, що діють на робочі органи, а також можливість механізації процесу зміцнення для підвищення ефективності робіт і зниження витрат на технічне обслуговування. Використання локального зміцнення у найбільш вразливих зонах забезпечує продовження терміну служби полиць, підвищує їхню надійність, знижує потребу в частих ремонтах і сприяє збереженню високої якості обробітку ґрунту[6,8].

Щодо зношування лемешів, допускається їхнє спрацювання по ширині до 10 мм відносно початкових розмірів, тоді як для носка долотоподібного лемеша допустиме зменшення довжини до 20 мм порівняно з новим виробом. Дотримання цих параметрів забезпечує належну якість обробітку ґрунту, зберігаючи робочі характеристики машин на ефективному рівні та запобігаючи передчасному зносу інших компонентів (рис.1.3).

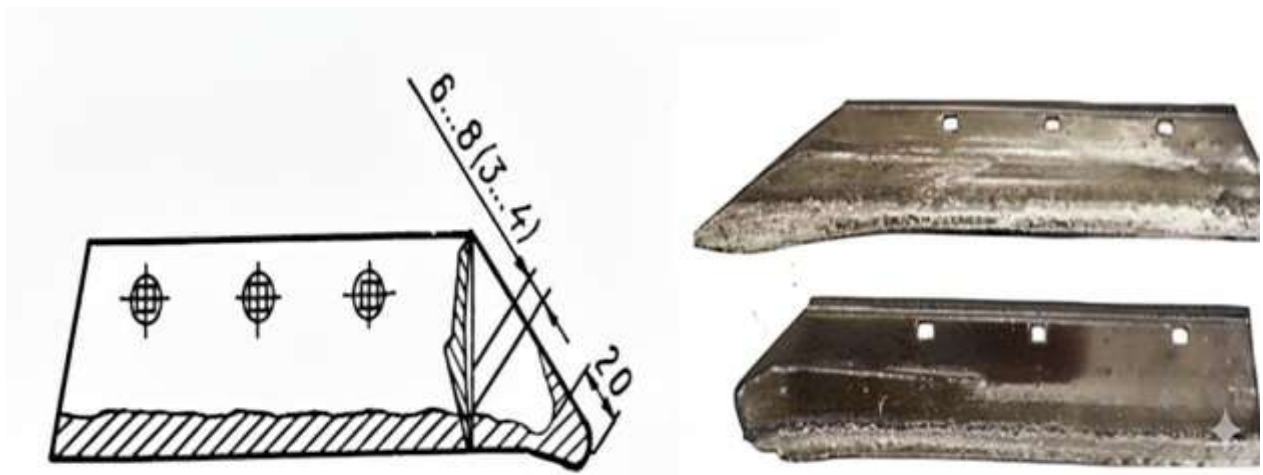


Рисунок. 1.3 – Контроль за зношуванням лемешів

Джерело: [6]

Допускається затуплення різальних крайок культиваторних лап і дисків до товщини 1–1,5 мм без суттєвого впливу на ефективність роботи. Оцінювання стану робочих органів машин, особливо чутливих до виглиблення, таких як плужні корпуси, ножі плоскорізів тощо, здійснюється переважно за шириною затилової фаски та лінійними розмірами. Для лемешів, що працюють на середніх за щільністю ґрунтах, допускається збільшення ширини затилової фаски до 6–8 мм із кутом нахилу до нерозпушеного шару ґрунту до 10° . У разі роботи на важких ґрунтах ці показники знижуються: допустима ширина фаски становить 3–4 мм, а кут нахилу може досягати 20° [6,9].

У сільськогосподарському виробництві ресурс деталей плугів не має чітких регламентованих обмежень і здебільшого визначається безпосередньо оператором агрегату. У переважній більшості випадків, втрата працездатності робочих органів через критичний рівень зношення призводить до необхідності заміни деталей ґрунтообробних машин, оскільки подальше використання може негативно вплинути на якість обробітку ґрунту та збільшити енерговитрати.

Деталі, що експлуатувалися в умовах піщаних та супіщаних ґрунтів, характеризуються наявністю канавок різної ширини та глибини, спрямованих у напрямку їхнього руху ґрунту. Це явна ознака процесів мікрорізання, які виникають під впливом абразивних часток ґрунту. Крім того, на поверхні деталей спостерігаємо сліди мікроконтактної корозії, що свідчать про додаткові процеси деградації матеріалу. Корозійні пошкодження утворюються внаслідок поєднання механічного та хімічного впливу агресивних середовищ, що поглиблює загальний рівень зношування деталей (рис. 1.4, 1.5) [4,7,9].

Така комбінація абразивно-корозійних процесів значно знижує ресурс робочих органів ґрунтообробної техніки, особливо в умовах інтенсивної експлуатації на ґрунтах із високим вмістом твердих часток.

Дослідження робочих елементів плугів, які експлуатувалися на суглинкових та глинистих ґрунтах, не виявило ознак абразивного видалення металу. Це свідчить про домінування полідеформаційного руйнування поверхневого шару. Таким чином, в цих умовах головним механізмом

зношування є не механічне зняття частинок абразивом, а його пластична деформація під впливом значних навантажень і тертя.

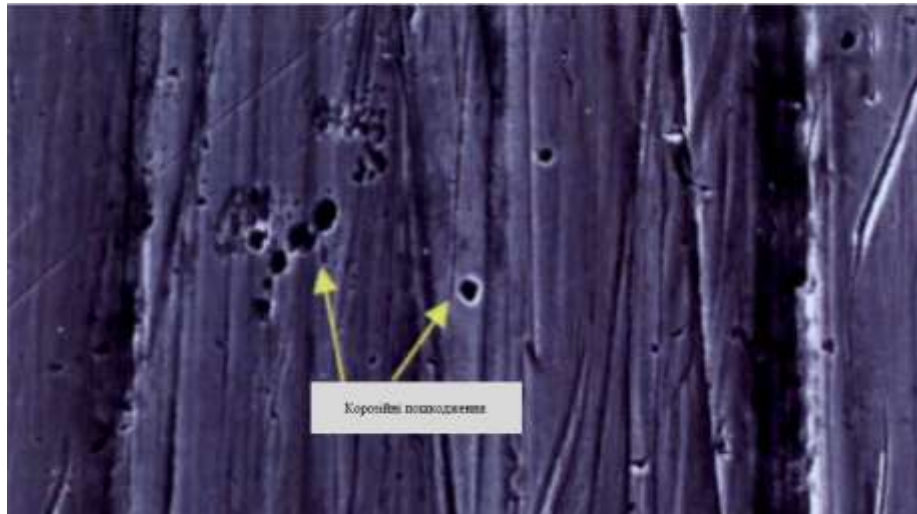


Рисунок 1.4 – Поверхня носка лемеша, який працює в умовах піщаного та супіщаного ґрунту

Джерело: [4]

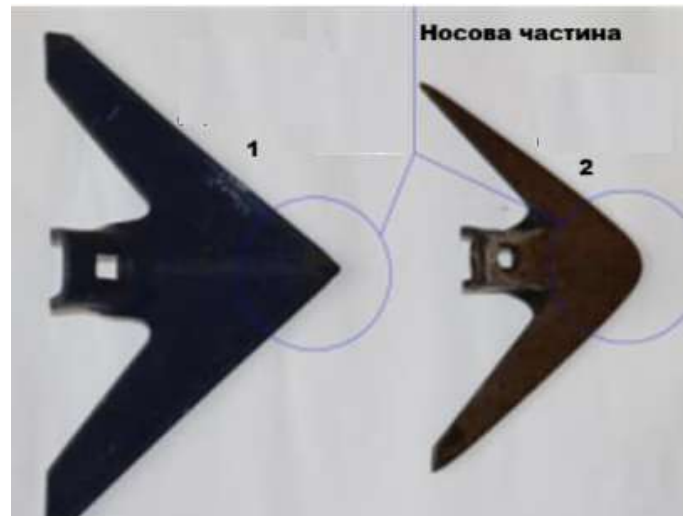
Такий тип зношування часто супроводжується утворенням мікротріщин і мікроскопічних деформацій поверхні, які призводять до поступового руйнування матеріалу без формування явних слідів зняття металу, як це спостерігається на ґрунтах із великим вмістом абразивних часток.



Рисунок 1.5 – Поверхня носка лемеша, який працює в умовах суглинкових та глинистих ґрунтів

Джерело: [4]

Основними дефектами культиваторів є затуплення та зношення різальних крайок лап, а також згин планок, важелів і стійки лап (рис. 1.6).



**Рисунок 1.6 – Вигляд лапи культиватора (Н.043.052.007); 1 – новий зразок;
2 – зношена**

Джерело: [6]

У дискових борін та луцильників можуть виникати такі дефекти як затуплення та викришування лез дисків, що призводить до погіршення якості обробітку ґрунту (рис. 1.7).

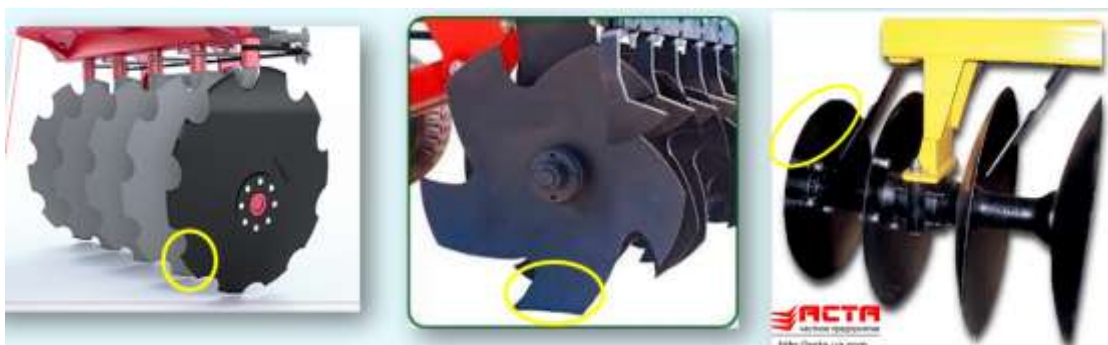


Рисунок 1.7 – Місце зношування дисків, дискової борони

Джерело: сформовано автором

Стан лап культиваторів та дискових ґрунторізальних робочих органів, які одночасно виконують подрібнення рослин і обробіток ґрунту, оцінюється за товщиною леза на відстані 0,5 мм від його вершини, що відповідає усталеній висоті. Така методика оцінки дозволяє визначити рівень зносу робочих органів і

вчасно вжити заходів для підтримки ефективності роботи техніки. Зниження товщини леза за цією відстанню свідчить про інтенсивне зношування і потребу в ремонті або заміні деталей для забезпечення належної якості обробітку ґрунту та рослин [4,9,12].

Типовими дефектами лемешів, лап культиваторів, дисків та інших ґрунторізальних деталей є затуплення різальних крайок і збільшення ширини затилованої фаски. Затуплення леза призводить до зниження ефективності роботи, оскільки погіршується здатність вирізати і обробляти ґрунт. Збільшення ширини затилованої фаски також впливає на робочі характеристики, зменшуючи точність і якість обробітку ґрунту.

Зношення лемешів та лап культиваторів залежно від наробітку показано на рисунках 1.8 і 1.9, де відображені зміни геометричних характеристик цих елементів після певного наробітку. Ці зміни безпосередньо впливають на ефективність роботи техніки та вимагають регулярного моніторингу для своєчасної заміни чи ремонту деталей, що зношуються [6,12,14].

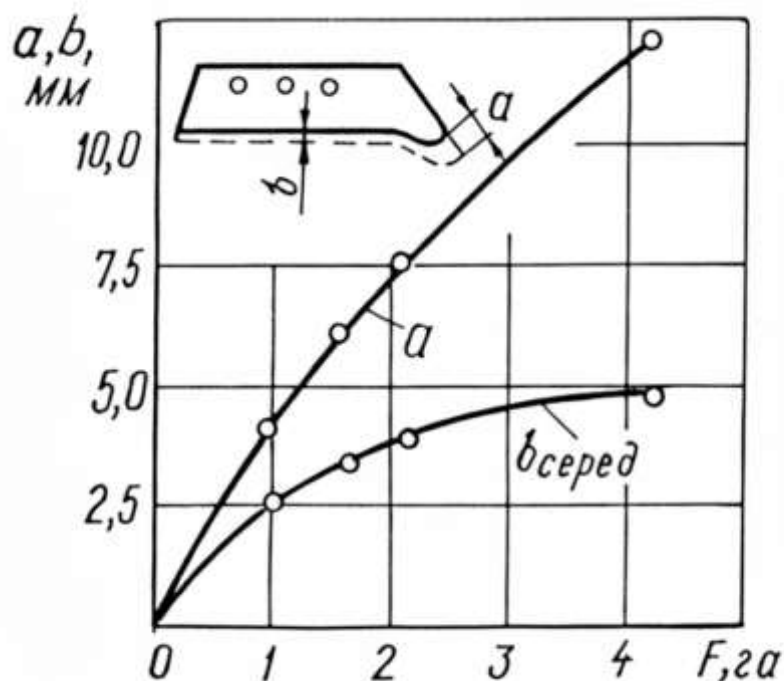


Рисунок 1.8 – Зміна параметрів лемешів при роботі на важких ґрунтах:

a – зношування носка; **b_{серед}** – зношування прямолінійної частини леза

Джерело: [6]

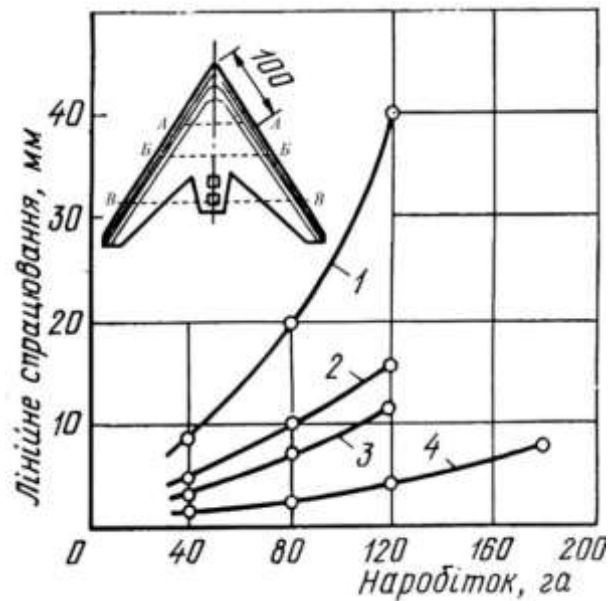


Рисунок 1.9. – Інтенсивність зношування лап культиваторів при експлуатації: 1 – у перерізі А-А; 2 – у перерізі Б-Б; 3 – у перерізі В-В; 4 – носка лапи (з додатковим наплавленням)

Джерело: [6]

Зі збільшенням ширини затилкової фаски b зростає кут її нахилу а до нерозпушеного шару ґрунту. Це, відповідно, призводить до збільшення виштовхувальної сили P , яка діє на леміш через потрапляння ґрунту в утворений кут α , що сприяє зростанню навантаження на робочий орган (рис. 1.10) [6,8,14].

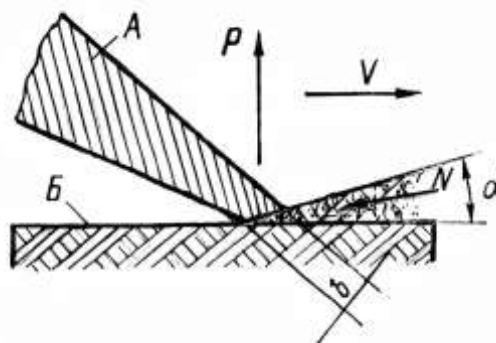


Рисунок 1.10 – Схема дії сил на леміш: А – лезо лемеша; Б – нерозпушений шар ґрунту; b – ширина затилкової фаски; N – сила дії розпушеного ґрунту на леміш; α – кут нахилу затилкової фаски; P – виштовхувальна сила; V – напрям руху

Джерело: [6]

Для контролю рівня спрацювання ґрунторізальних робочих органів використовуються штангенциркулі та спеціально розроблені шаблони, що дозволяють точно виміряти зміни в геометрії деталей (рис. 1.11). Така перевірка є важливою для своєчасної заміни або ремонту зношених деталей, що гарантує стабільну та ефективну роботу техніки.

Робоча поверхня ґрунторізальних робочих органів виготовляється з незагартованих, але досить міцних сталей марок 50, 65Г, Л-53, 28MnB4 з межею міцності $\sigma_b = 700\text{--}800$ МПа та твердістю, що не перевищує НВ 300 (додаток А, Б) [10,11]. Властивості цих сталей сприятливі для гарячого кування та механічної обробки твердосплавним інструментом. Результатом є забезпечення високої міцності несучого шару.

Проте сам різальний шар, виконаний із твердого сплаву, має порівняно нижчу міцність, але високу стійкість до зношення, з твердістю наплавленого шару НВ 750–780. Таке поєднання матеріалів утворює пошарову структуру леза, в якій несучий шар має високу міцність, а різальний — вищу стійкість до зношування.

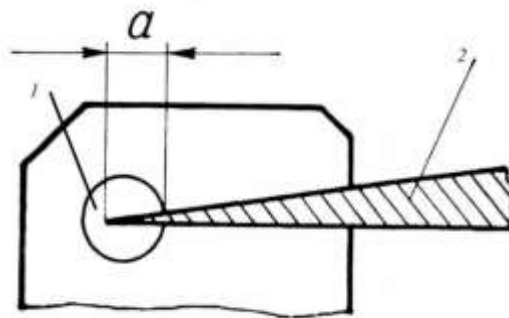


Рисунок 1.11 – Схема перевірки зношування леза шаблоном: а – допустиме входження леза у зів шаблона; 1 – шаблон; 2 – лезо леміша

Джерело: [6]

Ця структура дозволяє досягти ефекту самозагострювання робочих органів, яке відбувається завдяки прискореному зношенню несучого шару, що дозволяє зберігати оптимальний профіль леза, одночасно сповільнюючи зношування різального шару. Якщо це співвідношення буде менше, несучий шар

зноситься швидше за різальний, що призведе до оголення твердого сплаву, і він буде кришитися.

Щоб оптимізувати рівномірність зношування та викликати самозагострювання, стрілчасту лапу концептуально ділять на дві локації: ділянка 1 (де зношування є абразивно інтенсивним) та ділянка 2 (з помірною швидкістю спрацювання). (рис. 1.12).



Рисунок 1.12 – Схема нанесення зносостійкого покриття на робочу поверхню стрілчастої лапи для досягнення ефекту самозагострювання та рівностійкості зношування: 1, 2 – зона інтенсивного та помірного абразивного зношування відповідно

Джерело:[7]

На ділянці 2 проводиться точкове зміцнення, що надає різальному елементу пилеподібної конфігурації. Внаслідок формування цієї кромки підвищується якість виконання технологічної операції та досягається економія енергії за рахунок зменшення тягового опору в діапазоні 3,2–6,4%.

Якщо різальний шар зноситься швидше, то це призводить до швидкого затуплення леза, утворення затилкової фаски та інших негативних наслідків, що впливає на ефективність роботи ґрунторізального органу.

1.2. Методи підвищення зносостійкості робочих органів сільськогосподарських машин

Відновлення зношених робочих органів ґрунтообробних машин успішно здійснюється із застосуванням технології компенсації зношеного шару термічним впливом.

Багато проведено досліджень в науковому напрямку по термічному відновленню геометричних параметрів ґрунтообробних робочих органів, що відображено в дисертаційних роботах, наукових публікаціях, монографіях. Тому в цій роботі ми не розглядали різні види і способи термічного впливу при відновленні робочих органів ґрунтообробної техніки.

На основі новітніх досліджень розроблено технології виготовлення та відновлення робочих органів ґрунтообробної техніки із застосуванням вуглецевих сталей із вмістом вуглецю до 0,7% (матеріал сталь 50, 65Г, Л-53, 28МпВ4).

Деталі ґрунтообробних сільськогосподарських машин під впливом зовнішніх навантажень зазнають деформації [11,12,14].

Деформація – це процес зміни взаємного розташування ліній і поверхонь, що визначають конфігурацію деталі (її форму та розміри) під дією механічних впливів. Вона виникає внаслідок появи напружень у матеріалі деталі.

Для поліпшення експлуатаційних характеристик використовується локальне зміцнення лезової частини у верхній та нижній зонах. Згідно з джерелами [7,13], верхнє локальне зміцнення є найбільш ефективним: воно забезпечує зменшення зносу приблизно на 50% порівняно із серійними аналогами та на 1,13 раза краще, ніж нижнє зміцнення.

Збільшення зносостійкості культиваторних лап також може бути досягнуто шляхом точкового пластичного деформування критичних зон: носка, крил та різальної частини (з урахуванням залишкової постілі) (рис. 1.13).

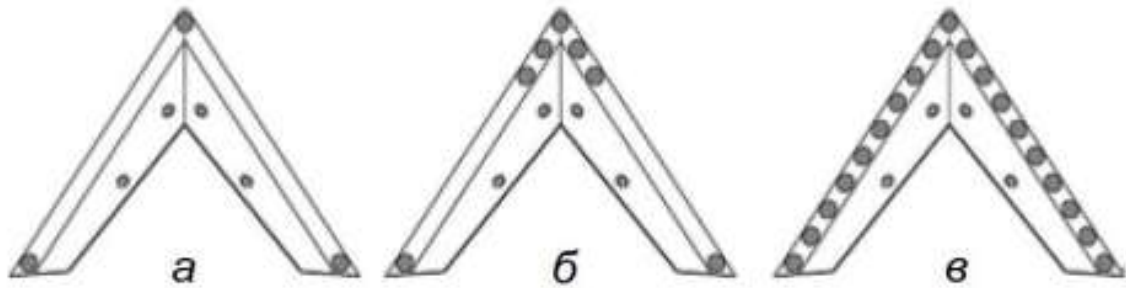


Рисунок 1.13. – Варіанти схем точкового зміцнення стрілочастих лап: а – зміцнення носової частини та кінців крил, що забезпечить робочу ширину захвату; б – інтенсивне зміцнення носової частини культиваторної лапи та кінців крил; в – зміцнення крил культиваторних лап по всій довжині з кроком 25 мм

Джерело: [7]

Одним із способів відновлення геометричних параметрів робочих органів ґрунтообробних машин є пластична витяжка. Пластична витяжка поділяється на «холодну» та «гарячу», при цьому гаряча витяжка виконується за температури нагрівання 500–650° С (рис. 1.14).



Рисунок 1.14 – Поверхня плуга, лемеш після наробітку 145 га

Джерело: [4]

Для покращення опору втомі та стійкості до зношування деталей широко застосовують наклеп [8,9,12,15], який покриває всю робочу поверхню, а також ділянки з високою концентрацією напружень. Зміцнення металу відбувається в процесі пластичного деформування, яке виникає, коли навантаження стає вищим за пружну міцність матеріалу. (рис. 1.15).

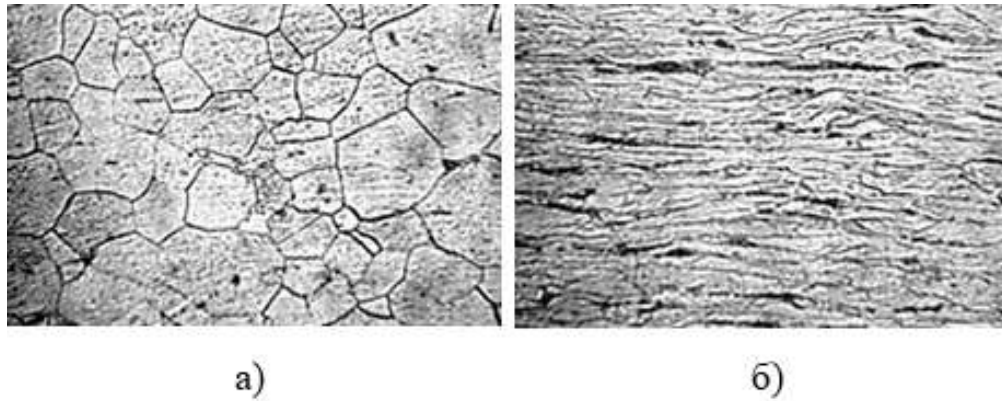


Рисунок 1.15 – Мікроструктура сталі 50: а) до прикладання пластичної деформації; б) після дії

Джерело: [10]

Для досягнення процесу деформації застосовують деформаційний вплив методом волочіння, прокатування, вальцювання та кування (рис. 1.16).

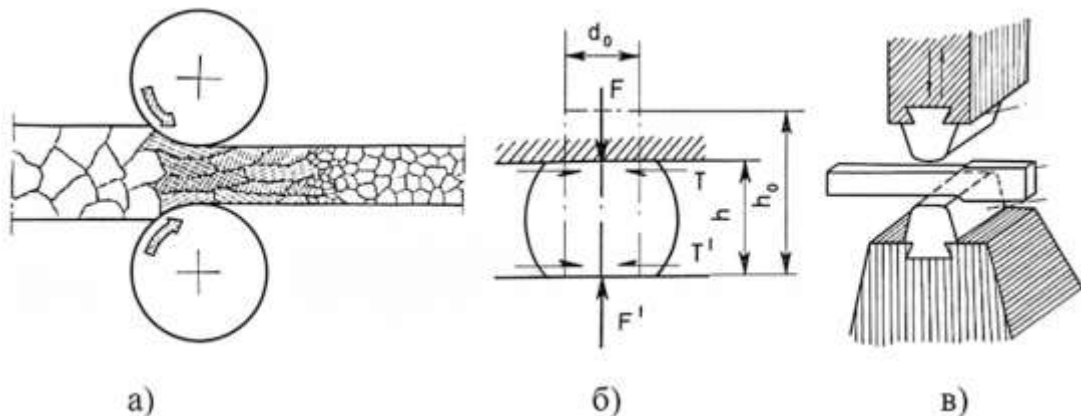


Рисунок 1.16 – Методи пластичного деформування: а) вальцювання; б) штампування; в) кування [8]

Джерело: [10]

Деформаційне зміцнення зовнішнього шару, призводить до генерації великої кількості кристалічних дефектів зокрема, дислокацій гвинтового та лінійного типів. Наслідком такого ущільнення дефектами є зростання стійкості поверхні до зносу та втомного пошкодження.

Для деформаційного зміцнення деталей можуть бути використані пневматичні та гідравлічні пристрої.

1.3. Вплив поверхнево-пластичного деформування на зміцнення робочих органів ґрунтообробної техніки

Виготовлення деталей сільськогосподарських машин здійснюється різними методами формоутворення, що потребує ретельної оцінки техніко-економічних аспектів і принципи добору. Оскільки вибір найефективнішого технічного рішення для виготовлення певної деталі є важливим, порівнюємо технічні витрати різних виробничих підходів. Особливо це актуально в контексті ґрунтообробних машин, де контактна поверхня та її виготовлення мають критичне значення для ефективності й довговічності роботи техніки [9,12,16].

Методи поверхнево-пластичної деформації (ППД) класифікують на статичні та динамічні залежно від характеру навантаження.

Поверхнєве пластичне деформування використовується для зміцнення робочих органів сільськогосподарських машин, під час якого відбувається пружно-пластичне деформування поверхневого шару. ППД базується на здатності металевої поверхні витримувати залишкову пластичну деформацію без порушення цілісності матеріалу. Цей процес є одним із найбільш ефективних методів підвищення надійності та зносостійкості робочих органів, що сприяє збільшенню їхньої тривалості служби та покращенню технічної ефективності сільськогосподарських машин.

У результаті підвищується твердість і міцність поверхневого шару, утворюючи сприятливу залишкову напругу стиску, зменшується параметр шорсткості R_a , радіус виточки у верхній частині нерівності, відносна базова довжина профілю мікронерівності тощо [17,18,19,20]. ППД на поверхні деталей використовується у всіх видах виробництва. Утворення поверхневого шару зі специфічними властивостями повинні бути забезпечити технології зміцнення.

Внаслідок пружно-пластичної деформації та локального нагрівання, що відбуваються під час ППД-обробки, відбувається формування нового напружено-деформованого стану та зміна агрегатного стану поверхні. Одночасно модифікуються мікрогеометрія та фізико-механічні властивості.

Поверхня набуває підвищеної твердості, має залишкові напруження стиску та мінімальні мікронерівності. Як наслідок, підвищується зносостійкість, втомна міцність, опірність корозії та ін. [11,14,16].

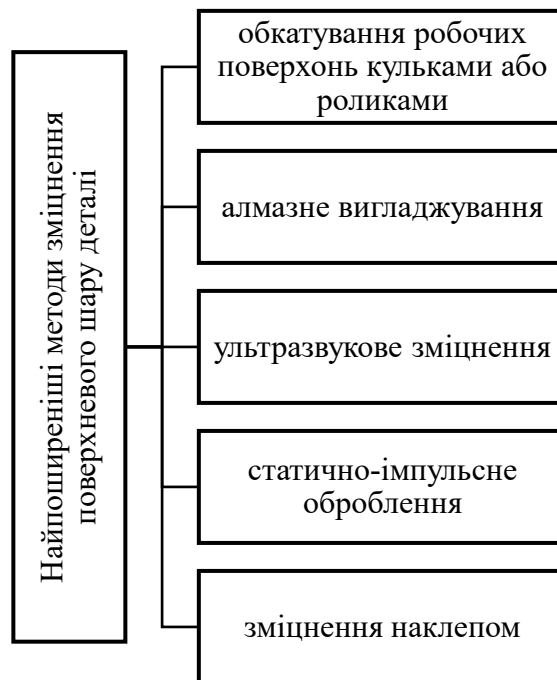
Обробка тонких зовнішніх шарів за допомогою ППД вирізняється низкою значних переваг порівняно з альтернативними методами обробки поверхні:

- Напружено-деформований стан: у зовнішньому шарі генеруються залишкові стискаючі напруження, які ефективно закривають і зменшують кількість існуючих концентраторів напружень.
- Термічна цілісність: метод є «холодним», тому термічні дефекти повністю виключені.
- Структура матеріалу: у поверхневому шарі формується дрібнозерниста структура при збереженні цілісності металу.
- Стабільність якості: забезпечується висока та стабільна якість обробленої поверхні.
- Точність форми та шорсткість: зберігається вихідна форма заготовки, при цьому досягаються мінімальні показники шорсткості обробленої поверхні.
- Оптимізація мікрорельєфу: мікронерівності набувають сприятливої форми з великою опорною площею на рівні виступів, формується регулярний мікрорельєф із необхідною площею та топографією заглиблень для ефективного утримання мастила.
- Контроль зміцнення: досягається потрібна товщина зміцненого шару по всій площі деталі, при цьому перехід між зміцненою та незміцненою зонами є плавним.

Метод поверхнево-пластичної деформації став поширеним через свою економічність і простоту впровадження (рис.1.17, табл. 1.1).

При обробці статичним методом деформуючий інструмент або робоче середовище діє на поверхню оброблюваної деталі з постійною силою, а інструмент і центр деформації під ним відповідно плавно переміщуються по всій поверхні деталі, що оброблюється [19,21,22,23].

При динамічному методі ППД робоче середовище (наприклад, у вигляді полірованої сталевий кульки) впливає на поверхню обробленої деталі шляхом повторних зіткнень. При цьому сила зіткнення змінюється від мінімуму до максимуму в кожному циклі. Обробці можна піддавати як всю поверхню деталі одночасно, так і зону впливу переміщувати послідовно поверхнею деталі або окремі ділянки, якщо потрібне локальне зміцнення.



*Рисунок 1.17 – Методи зміцнення поверхневого шару деталей
сільськогосподарських машин*

Джерело:[21]

Статично-імпульсна обробка є значним кроком у розвитку ударного карбування, представляючи собою впорядкований імпульсний вплив спеціальних бойків. Це новий підхід до ППД, який відрізняється унікальним методом введення енергії в зону обробки.

Пластична деформація металу реалізується шляхом керованого імпульсу, переданого через систему боек-хвилеводів до інструменту, що знаходиться під статичним навантаженням. Статичний підтиск інструменту до поверхні збільшує

зону контакту, забезпечуючи чистішу передачу ударного імпульсу та мінімізуючи втрати енергії. [23,25,26].

Таблиця 1.1

Найпоширеніші методи зміцнення поверхневого шару деталей.

Метод	Основні параметри	Характеристика
Обкатування кульками або роликами	Зусилля обкатування, подача інструменту, кількість проходів і припуск на обробку	Реалізується за допомогою спеціальних кульових або роликових накатних пристроїв на токарних верстатах. Сприяє зменшенню шорсткості, зростанню мікротвердості зовнішнього шару та формуванню залишкових напружень стиску
Статично-імпульсне оброблення	Статичний підтиск інструменту до оброблюваної деталі (для збільшення зони контакту та мінімізації спотворень ударного імпульсу)	Є різновидом ударного зміцнення поверхні. Його особливістю є унікальний спосіб передачі енергії у зону пластичного деформування
Деформаційний наклеп	Включає дію деформаційних зусиль і фазові перетворення у структурі матеріалу	Виникає внаслідок зовнішньої деформаційної дії на матеріал. Призводить до формування певної текстури та зміцнення поверхневого шару
Алмазне вигладжування	Абразивні алмазні інструменти	Застосовується для усунення мікронерівностей і полірування поверхні. Кінцевий результат – підвищення гладкості та зниження шорсткості поверхні
Ультразвукове зміцнення	Ультразвукові коливання	Використовується для зміцнення зовнішнього шару матеріалу, сприяючи створенню сприятливої мікроструктури та ущільнених шарів

Джерело: [29]

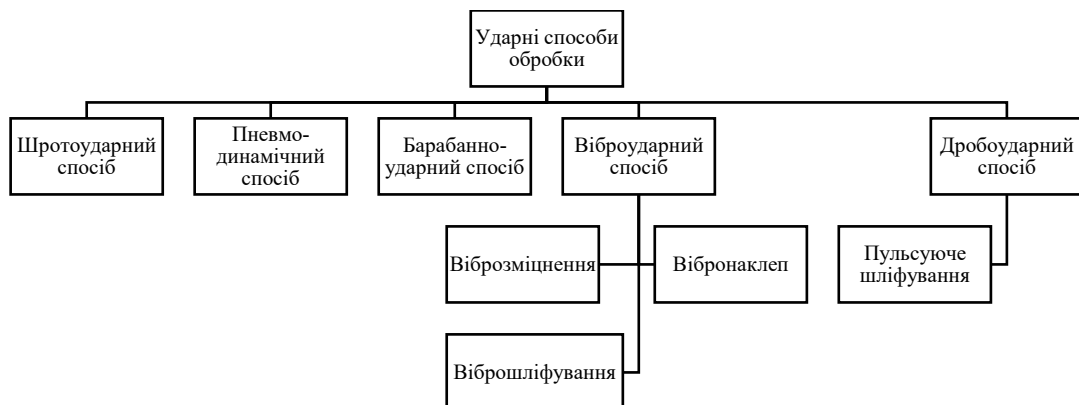


Рисунок 1.18 – Ударні способи обробки пластичних металів

Джерело: [29]

Технологія зміцнення складається з етапів попереднього статичного та подальшого періодичного імпульсного навантаження інструменту. Для генерації імпульсів використовується спеціальний високочастотний пристрій, який дозволяє оперативно регулювати частоту та енергію імпульсного впливу.

Перелічені методи ППД є поширеними засобами для зростання довговічності та підвищення надійності деталей під навантаженням (рис.1.18).

Шротоударна обробка є найбільш поширеною технологією. Вона функціонує на принципі використання кінетичної енергії шроту, який приводиться в рух різними способами: стисненням повітрям, рідиною під тиском або гравітацією. В якості робочого матеріалу найчастіше використовують сталевий або чавунний шріт [23,26].

Розмір шроту варіюється в широкому діапазоні — від 50 мкм до 6 мм, залежно від поставленого завдання. Цей метод застосовується для зміцнення практично всіх видів металевих матеріалів і деталей: як для суцільної обробки при виготовленні (включно з формуванням), так і для видалення лакофарбових покриттів чи локального оброблення (наприклад, під час ремонту або складання).

Окремим випадком є пневмодинамічний метод: так називають процес, коли розгін кульок у замкненому просторі здійснюється за рахунок енергії стисненого повітря, яке надходить у цей об'єм.

Принцип барабанно-ударної обробки ґрунтується на використанні енергії зміцнювального середовища, яка генерується шляхом його прискорення відцентровими силами та гравітацією. Деталі, що підлягають зміцненню, фіксуються на щитах, які є частиною стінок барабана (що може мати прямокутну чи шестигранну форму), або розташовуються уздовж осі обертання барабана.

У якості робочого середовища (у разі зміцнення високоміцних деталей) застосовуються частинки кубічної форми, виготовлені з високоміцних алюмінієвих сплавів або сталей. Під час обертання барабана частинки середовища прискорюються, досягають верхньої точки, відриваються від

поверхні розгону та вдаряються об поверхню деталі, викликаючи зміцнювальний ефект.

Віброударний метод використовує енергію, що передається через вібраційне середовище. Як робоче тіло застосовуються сталеві кульки, абразивні гранули тощо. Суть методу полягає в наступному: робоче середовище та деталі розміщуються у контейнері (резервуарі) віброустановки, яка піддає їх механічним коливанням із прискоренням до $10-15 \text{ м/с}^2$. В результаті цього частинки робочого середовища набувають достатньої енергії для пластичного деформування зовнішнього шару деталі.

Висока рухомість частинок у середовищі забезпечує рівномірний та стабільний наклеп, а також постійні значення залишкових напружень у поверхневому шарі. Цей метод характеризується простотою, високою продуктивністю та значними технологічними можливостями, зокрема, здатністю обробляти деталі будь-якої форми, розміру та матеріалу [23,26,27,28].

Віброзміцнення (ВЗ) у середовищі сталевих кульок дає оптимальні результати і часто називається вібронаклепом (ВН).

При потребі у великій глибині зміцнення (понад 0,3 мм для сталі; понад 0,4–0,5 мм для алюмінієвих сплавів) ефективність віброударного методу обмежена, і замість нього слід застосовувати шROTOударну обробку.

Зміцнення, що відбувається в контейнері з абразивом, який виконує прямолінійний зворотно-поступальний рух, відоме як пульсаційне шліфування (ПШ). Метою ПШ є зміна структури зерна металу, його твердості та фізико-механічних характеристик.

Абразивний наповнювач у цьому методі ППД-зміцнення вільно розміщений у контейнері і, завдяки великій інерції, зберігає свій статичний стан під час руху. Оскільки абразивний матеріал нерухомий, а деталь, що обробляється, виконує зворотно-поступальні рухи, абразивне середовище зміщується по поверхні, спричиняючи зняття металу. Це забезпечує поверхневу абразивну обробку. Паралельно з механізованою зачисткою відбувається зміцнення деталей. Характерні параметри ПШ: для сталевих виробів амплітуда пульсування

становить 110–150 мм при частоті 300–500 коливань/хв; для алюмінієвих сплавів ці значення — 80–90 мм та 200–400 коливань/хв відповідно. Крім описаних, існує багато інших способів ударного зміцнення (наприклад, відцентрово-ударний, ультразвуковий, чекання, зміцнення вибухом), які можна об'єднати в групу динамічних видів зміцнення [26,27].

Внаслідок пластичної деформації поверхня набуває згладженого мікрорельєфу з нижчою висотою профілю нерівностей R , а розміри деталі скорочуються на величину залишкової деформації Δ . Завдяки мінімальній площі контакту інструмента з поверхнею, для обробки потрібне незначне зусилля (200 – 300 Н). Це дозволяє ефективно застосовувати даний спосіб для зміцнення тонкостінних елементів.

1.4 Механізми деформаційного наклепу та їх використання в технології зміцнення

Пружно-пластична деформація під час ППД-обробки формує новий напружено-деформований та фізичний стан поверхневого шару, змінюючи мікрогеометрію і фізико-механічні характеристики оброблених деталей.

Важливо усвідомлювати, що величина використаного ресурсу пластичності залежить від умов ППД і може бути різною навіть при однаковому ступені зміцнення (який визначається накопиченою деформацією). Експериментально встановлено, що якщо використаний ресурс пластичності ψ досягає 0,5 – 0,6 і вище, це викликає зниження довговічності деталі на 60 – 80% при незмінній шорсткості та ступені зміцнення. [27,29,30,31].

Під час механічної та інших видів обробки металу поверхневий шар деталі завжди є пластично деформованим. Пластична деформація спричиняє деформаційне зміцнення поверхневого шару, яке залежить від режимів обробки, застосованого інструмента, його стану та інших умов обробки.

Метали та сплави (полікристалічні матеріали) реагують на деформацію зміною форми і орієнтації своїх зерен, створюючи направлену структуру з

переважним орієнтуванням кристалів. Це відбувається через поворот хаотично орієнтованих зерен, які вибудовують осі найвищої міцності вздовж напрямку прикладеної деформації.

Зерна сплющуються і видовжуються у напрямку плину металу (рис. 1.19). Явище переважного орієнтування кристалів (зерен) уздовж напрямку деформації називається текстурою деформації металу.

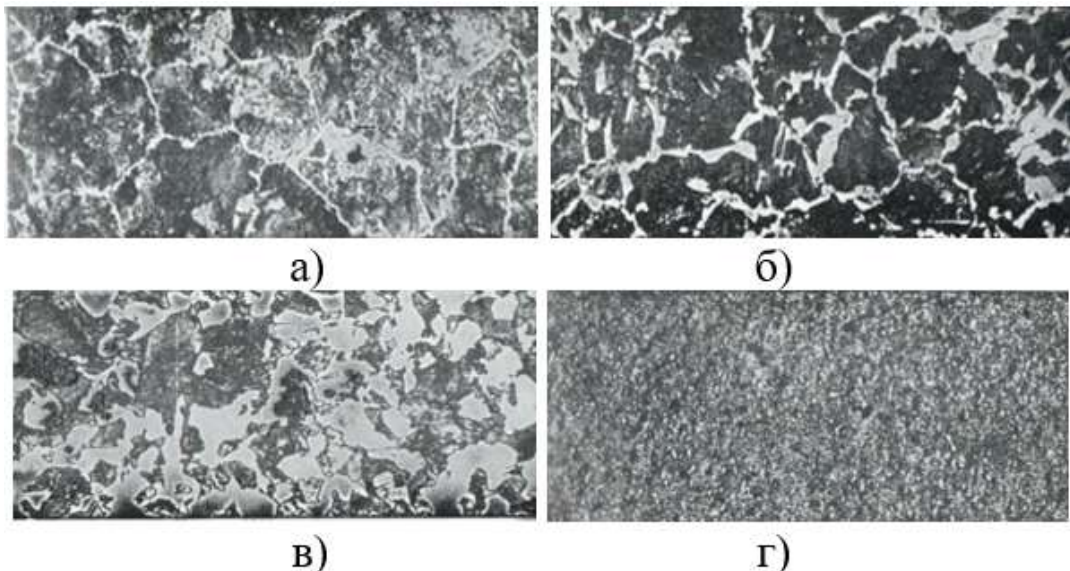


Рисунок 1.19 – Схема зміни мікроструктури полікристалічного металу (сталь 50) при деформації: а) вихідний стан, $\epsilon=0\%$; б) $\epsilon=1\%$; в) $\epsilon=40\%$; г) $\epsilon=80\ldots90\%$

Джерело: [26]

Аналіз змін у внутрішній будові металу проводиться на основі коефіцієнта деформації матеріалу (ϵ). Утворення текстури деформації є причиною виникнення анізотропії — різного значення властивостей вздовж та впоперек кристалічних площин.

Існують властивості, які нечутливі до структурних змін і не залежать від ступеня деформування: валентність, періоди кристалічної ґратки, температура плавлення, модуль пружності, інтенсивність намагнічування та теплоємність.

З цього випливає, що пластична деформація ініціює суттєву трансформацію як структури металу, так і його властивостей. Деформаційне зміцнення (наклеп) є ключовим інструментом для підвищення механічної

стійкості деталей. Наприклад, поверхневий наклеп роликками, зміцнення струменем дробу та ультразвукова обробка значно покращують опір втомі. Водночас, ефект зниження пластичності при наклепі використовують для полегшення різання пластичних та в'язких металів, зокрема латуней та сплавів на основі алюмінію [30,31,32].

Обробка деталей кульками в спеціальних ультразвукових ємностях забезпечує зростання опору втомі на 15–25 %, продуктивності зміцнення в 10-15 разів, а також скорочення потреб у виробничих площах порівняно з шротоструменевою або вібраційною обробками.

Варто зазначити, що ультразвукова обробка металів сприяє підвищенню експлуатаційних характеристик деталей, виробів і конструкцій, і, зрештою, їх довговічності та надійності. Ультразвукова обробка металевими кульками як метод зміцнення металу має низку особливостей: це експресивний (швидкий) і високоефективний процес, що дозволяє обробляти навіть ті вироби, які не піддаються зміцненню іншими засобами. Крім того, комбінування ультразвуку з іншими методами зміцнення часто посилює їхню загальну ефективність.

Додатковими перевагами ультразвукового зміцнення є можливість створення поверхневого, об'ємного наклепу або їх комбінації для певного класу деталей. Цей процес дозволяє досягти оптимального розподілу внутрішніх напружень і такого структурного стану, що підвищує запас міцності деталей, які працюють під змінними навантаженнями, у два-три рази. Як наслідок, термін їхньої служби може бути значно збільшений — іноді в десятки разів.

Зміцнення деталей відбувається у закритому об'ємі завдяки кінетичній енергії зміцнювальних тіл — металевих кульок, діаметр яких коливається від 0,68 до 3,5 мм.

Деформаційний наклеп є результатом дії зовнішніх деформаційних сил. Кристалічна структура пластично деформованого металу характеризується не тільки деформуванням кристалічної ґратки, але і певним орієнтуванням зерен — текстурою. Безладно орієнтовані кристали під дією деформації повертаються осями найбільшої міцності уздовж напрямку деформації [29,31,32].

Деформаційне зміцнення проводиться з метою зниження шорсткості, зміцнення поверхневого шару та калібрування (покращення точності розмірів і форми). Інструмент, притиснутий до оброблюваної поверхні із силою, заглиблюється на глибину h і згладжує мікронерівності під час свого руху.

Висота шорсткості у напрямі швидкості (подовжня шорсткість) зазвичай є значно меншою, ніж висота поперечної шорсткості (у напрямі подання). Після контакту з інструментом поверхня частково пружно відновлюється. Перед випресовувачем утворюється наплив пластично деформованого металу, що спричиняє значно більше навантаження на його передню поверхню, ніж на задню. Ця нерівномірність, а також адгезійна взаємодія, призводять до виникнення тангенціальної складової сили під час випресовування.

Деталь зменшується в розмірах на величину залишкової деформації. На кінцеву форму нерівностей впливають неоднорідність початкової шорсткості, твердість поверхні, а також коливання сили випресовування, спричинені, зокрема, биттям деталі. Це призводить до відмінностей між початковим і отриманим у процесі деформації мікрорельєсами [33,34,35]

Типовий ультразвуковий пристрій для зміцнення, показаний на рисунку 1.20, складається з магнітострикційного перетворювача (1), який генерує ультразвук, та з'єднаного з ним хвилевода (тонкостінного циліндричного стакана, позначеного як 2). За допомогою фланця (3) до стакана кріпиться робоча камера (4). Пристрій має кришку (5), на якій фіксується оброблювана деталь або група деталей (6).

Металеві кульки необхідної маси розміщують на дні хвилевода. Після запуску генератора ультразвуку кульки поступово переміщуються у верхню камеру, де здійснюють зміцнення встановлених деталей. Ця система може застосовуватися для невеликих деталей або тестових зразків. Хвилевод також відомий як концентратор. Існують різні види концентраторів: стакан, тор, ступінчастий та інші.

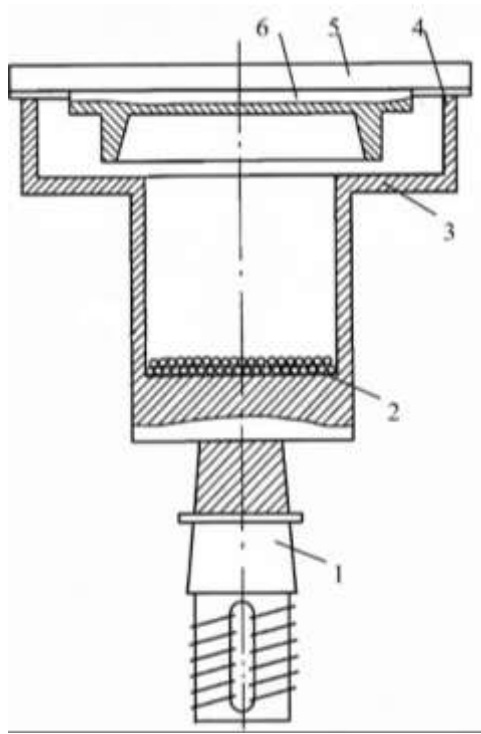


Рисунок 1.20 – Ультразвуковий пристрій для зміцнення деталей:
1 – магніострикційний перетворювач ультразвукових коливань; 2 –
хвилевод; 3 – фланець 4 – робоча камера; 5 – кришка 6 – оброблювана
деталь.

Джерело: [35]

На рисунку 1.21 зображено установку для поверхневої зміцнювальної обробки, яка оснащена ступеневим концентратором (1). Пристрій живиться від генератора (4), який передає ультразвукові коливання через магніострикційний перетворювач (3).

На торцевій частині хвилеводу сформовано асиметричне гніздо (2), призначене для розміщення як оброблюваної деталі (6), так і робочого інструменту — сталевих кульок (5). Кульки, які інтенсивно рухаються всередині гнізда, вдаряються об поверхню деталі (6), забезпечуючи її зміцнення. Технологічний фланець (7) розміщений перпендикулярно хвилеводу на опорних стійках (8), які, разом із магніострикційним перетворювачем (3), закріплені на станині (9) пристрою.

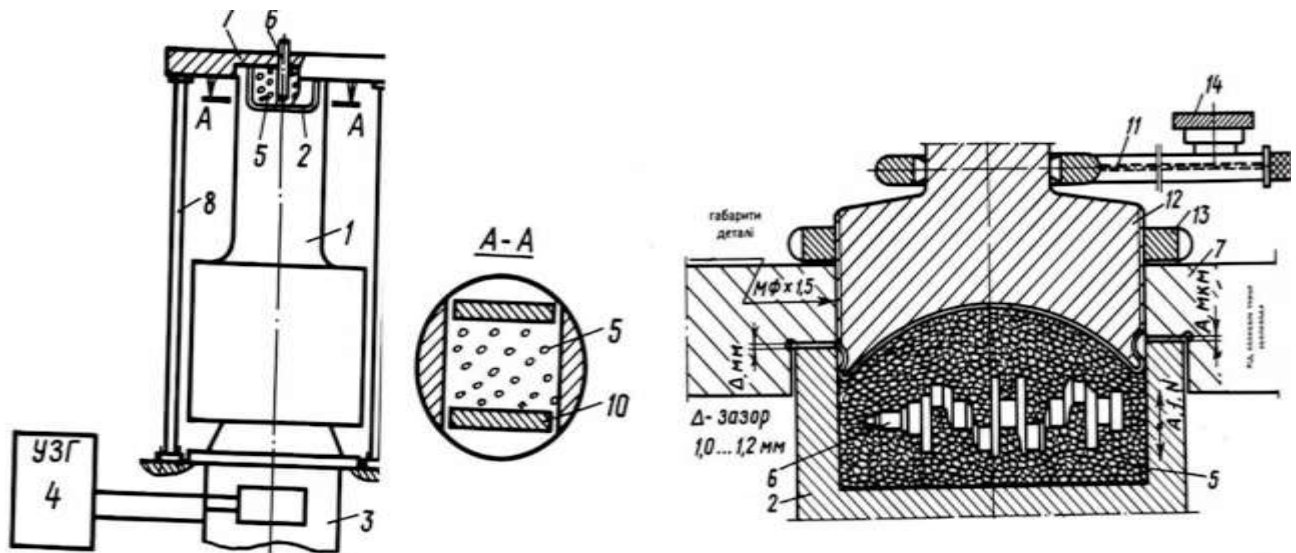


Рисунок 1.21 – Пристрій для зміцнення деталей «колінчастий вал»: 1 – концентратор; 2 – асиметричне гніздо; 3 – магнітострикційний перетворювач; 4 – генератор; 5 – сталеві кульки; 6 – поверхня деталі; 7 – технологічний фланець; 8 – опорні стійки; 9 – станина; 10 – кришки; 11 – динамометричний ключ; 12 – пуансон; 13 – опора; 14 – прилад для вимірювання статичного зусилля

Джерело: [36]

З метою підвищення якості та швидкості обробки сталеві кульки ущільнюються в гнізді за допомогою пуансона (12) і динамометричного ключа (11), оснащеного вимірювачем статичного зусилля (14). Обробка деталі виконується в режимі дробового впливу, ультразвукового впливу або в комбінованому варіанті.

Пружність форми є ключовою властивістю твердих тіл, яка дозволяє їм протистояти зміні форми під дією механічних напружень. Ця пружність забезпечує передачу не тільки напружень стиснення і розтягування, а й зсувних і крутильних напружень. Як наслідок, у твердих матеріалах можуть генеруватися поздовжні, поперечні, крутильні та інші види хвиль [31,33].

Варто зазначити, що втомну міцність деталі можна покращити, якщо режими вигладжування обирати, ґрунтуючись на механічних характеристиках матеріалу, товщині стінки, рівні залишкових напружень, виді попередньої

обробки і конструктивних особливостях.

1.5. Конструктивні особливості віброзбуджувачів для забезпечення поверхнево-пластичної деформації

ППД створює в поверхневих шарах деталі численні точкові та лінійні дефекти (лінійні та гвинтові дислокації) кристалічної решітки. Це підвищує стійкість цих шарів до зношування та втомного руйнування [31,37,38]. ППД як метод деформаційного зміцнення поверхні деталей може реалізовуватись за допомогою різних пристроїв з механічним, пневматичним або гідравлічним приводом. Найбільш компактними є гідравлічні пристрої, зважаючи на переваги гідроприводу.

Серед різних типів гідроприводів найбільш перспективним вважається гідроімпульсний, який дозволяє створювати компактні пристрої для деформаційного зміцнення поверхонь деталей.

Виконання вібраційних процесів відбувається із застосуванням вібраційних і віброударних установок. Виготовлення даного устаткування здійснюється за стандартною структурною схемою, що включає такі підсистеми: джерело енергії, привід енергоносія, система розподілення та управління енергією. Звідти енергія спрямовується до приводу генератора вібрацій (який взаємодіє з виконавчою робочою ланкою) та до приводу допоміжних ланок, представлених пуансоном — інерційною масою.

Відповідно до цілей технології чи випробування, можна використовувати або безударну дію, або ударно-вібраційну, коли вібраційний рух інерційної маси супроводжується послідовними ударами.

Конструктивні особливості та номенклатура вібраційного обладнання передбачають наявність базових елементів традиційних пресів, тоді як вібраційні й віброударні машини успішно застосовуються в різних промислових сферах (рис.1.22).

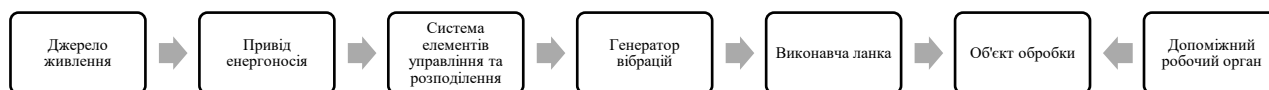


Рисунок 1.22 – Структурна схема типової вібраційного обладнання

Джерело: [25]

Ударна дія може генеруватися безпосередньо у віброзбуджувачі або у вібраційному приводі (тобто у комплексі пристроїв, що створюють, трансформують та передають вібрацію до виконавчого органу машини). Також удари можуть виникати під час зіткнення виконавчого органу машини з оброблювальним середовищем.

Залежно від способу збудження вібрацій, розрізняють такі методи: відцентровий, електромагнітний, електродинамічний, кінематичний, примусовий гідравлічний та пневматичний [38,39].

Залежно від методів збудження приводи вібраційних технологічних машин поділяють на: механічні, гідравлічні, пневматичні, електричні, комбіновані.

Серед усіх віброзбуджувачів, які використовуються в промислових процесах, відцентрові мають найбільше застосування.

Кінематичні віброзбуджувачі поділяються на відцентрові приводи (з пружним шатуном або з демпфером) і класифікуються за наявністю регулювання амплітуди. Регульовані приводи можуть налаштовуватися під час роботи або у неробочому стані машини, а їхнє регулювання буває плавним чи ступінчастим. Кінематичні збуджувачі придатні для створення прямолінійних гармонійних, бігармонійних та еліптичних коливань.

В електромагнітних віброзбуджувачах сили коливання створюються через вплив змінного магнітного поля на феромагнітні матеріали [40,41,42].

Електродинамічні віброзбуджувачі (ЕВ) активно застосовуються у сфері вібраційних випробувань. Їх використовують для тестування зразків матеріалів, деталей, вузлів та приладів, а також для натурних випробувань агрегатів, машин і транспорту. Крім того, вони слугують інструментом для вивчення властивостей

сипучих середовищ та поведінки біооб'єктів. У технологічних операціях ЕВ застосовуються рідше.

Залежно від призначення, потужності та частотного діапазону віброзбуджувача, його конструкція може бути доповнена системами охолодження, пристроями для направлення вібрацій та підсилювально-послаблювальними системами.

Характеристики відтворюваних вібрацій охоплюють широкий діапазон параметрів. Основними робочими показниками ЕВ є амплітуда та діапазон вимушеної сили.

Середня потужність ЕВ типово працює у частотному діапазоні 5 – 3000 Гц. Спеціальні моделі дозволяють проводити випробування на частотах до 15–30 кГц. За допомогою додаткових підсилювачів можлива робота на частотах, нижчих за 1 Гц. Амплітуда створюваної сили варіюється від 1 Н до 500 кН. ЕВ здатні генерувати випадкові коливання та виконувати вібраційні дослідження відповідно до заздалегідь визначеної програми.

Пневматичні віброзбуджувачі — численна група пристроїв, що використовують енергію стисненого повітря і зазвичай функціонують від стандартних промислових пневмомереж із тиском 2–7 атм.

Віброзбуджувачі класифікуються за методом дії:

- Пульсаторного типу: підходять для низькочастотних режимів (до 15 Гц), генеруючи при цьому великі амплітуди (до 20–30 мм) і значні зусилля.
- Автоколивальні: працюють у частотному діапазоні приблизно 15–60 Гц, забезпечуючи можливість отримання достатньо великих амплітуд і сил.
- Відцентрові: використовуються в діапазоні частот 20–400 Гц.
- На основі автоколивань стисненого повітря: дозволяють досягати дуже високих частот (до 2000 Гц), але мають незначні амплітуди (до 0,2 мм).

Передача коливань до виконавчої ланки вібромашини в гідравлічних віброзбуджувачах може здійснюватися двома способами: або шляхом використання джерела робочої рідини, що генерує імпульси, або через механічне

переривання потоку рідини з постійною подачею за допомогою золотників чи інших регуляторів [41,42,43].

Принцип дії гідравлічних віброзбуджувачів дозволяє розділити їх на такі види: пульсаційні, автоколивальні, слідкувальні і самокерувальні.

Робота пульсаційних збуджувачів (перша група) базується на використанні тиску пульсації, створюваного потоком пульсуючої робочої рідини, для збудження виконавчого органу (гідроциліндра).

Автоколивальні та самокерувальні гідравлічні віброзбуджувачі створюють періодичну змушувальну силу при роботі від джерела постійного тиску. Усередині віброзбуджувача вбудована спеціалізована система, яка автоматично регулює циклічну подачу та відведення робочої рідини. Поршень гідроциліндра при цьому виконує функцію самостійного керування золотником, чим забезпечує безперервний зворотно-поступальний рух [43].

Коливання в автоколивальних системах збуджуються завдяки нелінійному елементу — зазору у жорсткому зворотному зв'язку. У самокерувальних віброзбуджувачах коливання створюються пристроями, які перемикають регулювальний золотник у момент досягнення поршнем гідроциліндра крайнього положення. Частота регулюється підведеним тиском, а амплітуда — зазором у зворотному зв'язку автоколивального типу.

Номенклатура генераторів імпульсів тиску класифікується на одно-, дво- та багатокаскадні (за принципом роботи) та на клапанні, кулькові і золотникові (за типом запірних елементів, див. табл. 1.2).

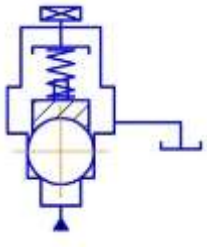
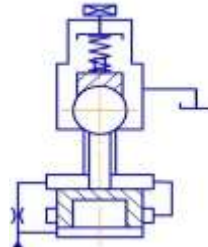
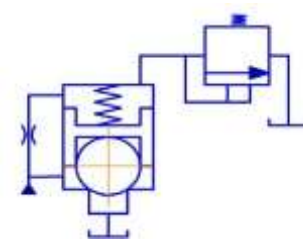
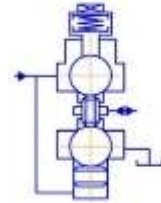
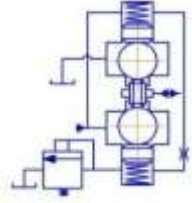
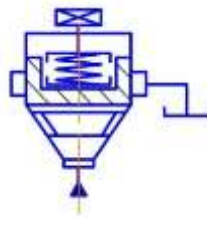
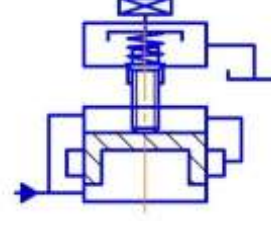
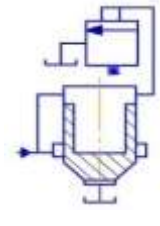
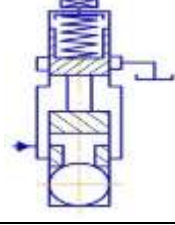
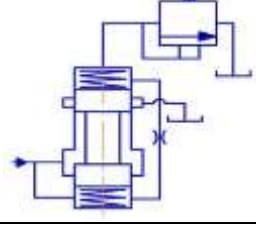
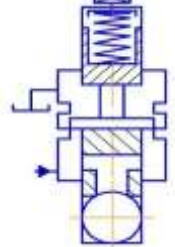
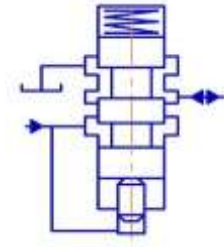
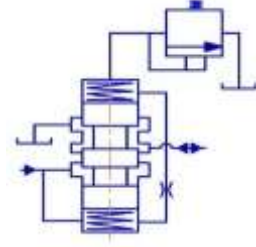
За принципом збудження пульсаційні віброзбуджувачі поділяють на дві групи: ті, що використовують насоси, які генерують пульсації, та пристрої з золотником, що виконує функцію створення пульсацій.

У гідророзподільниках цих пристроїв для керування потоком застосовується обертальний або поступальний рух золотника, що активується зовнішнім приводом. Регулювання частоти коливань віброзбуджувача досягається зміною швидкості руху гідророзподільника (обертання чи зворотно-

поступального). Амплітуда коливань контролюється шляхом модифікації тиску робочої рідини.

Таблиця 1.2

Схеми вібробуджувачів ГІТ

Вібробуджувач			Однокаскадні		Двокаскадні
			зі штовхачем	зі змінною площею	
Типи запірних елементів	Кулькові	2/2			
		3/2			
	Клапанні	2/2			
	Золотникові	2/2			
		3/2			

Джерело:[23]

Однією з важливих реалізацій гідравлічного вібробудження є гідроімпульсний привод (ГІП). Його головний елемент — генератор імпульсів тиску (ГІТ), який також відомий як «клапан-пульсатор» або «гідроімпульсний

віброзбуджувач». Комплектація ГПІ включає гідравлічний насос, який забезпечує постійну подачу, гідроаккумулятор, що згладжує нерівномірності потоку, та сам ГПІ.

Залежно від точки підключення ГПІ до вібраційної машини, їх поділяють на конфігурації «на вході», «на виході» та «комбіновані». Одно- і двокаскадні ГПІ використовуються переважно для однокомпонентних вібраційних навантажень. Натомість багатокаскадні системи застосовуються для забезпечення багатоконтактного навантаження, що дозволяє досягти необхідної координації між усіма ступенями свободи виконавчого механізму. Різноманітність схем ГПІ відображена у таких конструктивних моделях, як А1Ш1-Б32, А2К1-БК2, Р202 та А232-Б32 [23,25,43].

Конструктивну будову та загальний зовнішній вигляд Віброзбуджувач моделі А1Ш1-Б32 представлений на рисунку 1.23.

Конструктивно перший і другий каскади цього віброзбуджувача (А1Ш1-Б32) виконані як модулі, що стикуються один з одним. Функцію запірного елемента Каскаду І виконує клапан (4), тоді як для Каскаду ІІ цю функцію здійснює східчастий двокромковий золотник (1). Регулювання тиску спрацьовування Каскаду І забезпечується пружиною (5) та регулювальним гвинтом (6), а його робочий режим контролюється дроселем (8).

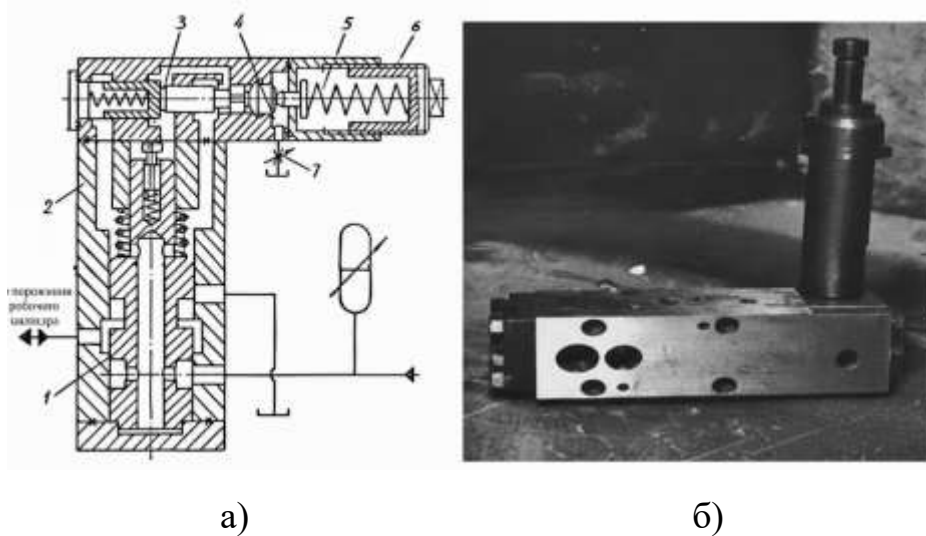


Рисунок 1.23 – Віброзбуджувач типу А1Ш1-Б32: а) конструктивна схема; б) загальний вигляд: 1 – двокромковий золотник; 2 – кришка корпусу;

3 – плунжер; 4 – клапан; 5 – пружина; 6 – регулювальний гвинт [12]

Джерело:[23]

Для підвищення довговічності золотника (1) Каскаду II було інтегровано гідравлічний гальмівний механізм: плунжер (3) (з виточкою і лисками на хвостовику) встановлений на верхньому торці золотника, а нижній торець має виступ, що взаємодіє з розточкою в кришці корпусу (2). Коли стандартний золотниковий елемент не забезпечує необхідної швидкості реакції Каскаду II, замість нього використовують віброзбуджувач типу А2К1-БК2.

На рисунку 1.24, а зображено будову другого каскаду віброзбуджувача А2К1-БК2. Клапан (6) першого каскаду забезпечує циклічне з'єднання напірної лінії з порожниною В, за умови, що вона не з'єднана зі зливом. При зростанні тиску до p^1 порожнина А з'єднується з порожниною В, що призводить до закриття випускного клапана (4). Штовхач (5) ініціює рух сервоклапана (3), відводячи його від сідла та створюючи з'єднання між порожнинами С і D.

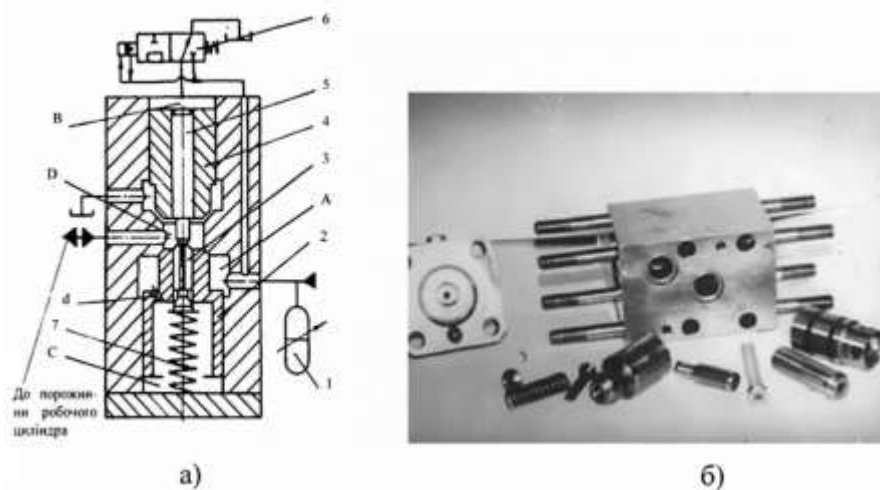


Рисунок 1.24 – Віброзбуджувач типу А2К1-БК2: а) конструктивна схема; б) загальний вигляд: 1 – акумулятор; 2 – впускний клапан; 3 – сервоклапан; 4 – випускний клапан; 5 – штовхач; 6 – клапан; 7 – пружина; А, В, С, D – порожнини; d – отвір

Джерело:[23]

Зміна тиску в отворі d викликає відкриття впускного клапана (2). У результаті цього напірна магістраль та акумулятор (1) об'єднуються з

порожниною робочого циліндра для передачі імпульсу. Після повного розрядження акумулятора (1) тиск у системі падає до значення p^2 . Клапан (6) перемикається, з'єднуючи порожнину В зі зливом, і випускний клапан (4) відкривається. Пружина (7) повертає сервоклапан (3) та впускний клапан (2) у вихідне положення (закриває), роз'єднуючи напірну магістраль і порожнину А від порожнини D. Цикл імпульсів відновлюється при повторному досягненні тиску p^1 .

Основним елементом управління всіх ГІТ є перший каскад, налаштування якого визначає активацію всієї подальшої системи. Отже, каскад І налаштовується на конкретний тиск спрацювання, а каскад II функціонує як потужна ланка, призначена для транспортування необхідного об'єму стисненої рідини від нагнітальної порожнини до робочої порожнини виконавчого циліндра.

Даний тип віброзбуджувача належить до комбінованих приводів, популярність яких стрімко зростає в сучасній промисловості. Це обумовлено тим, що використання простих (некомбінованих) систем часто недостатньо для виконання вимог модернізації виробництва, таких як глибока автоматизація та комп'ютерне управління. Застосування комбінованих приводів забезпечує високу інтенсивність технологічних операцій і значне зниження ймовірності помилок, спричинених людиною, що безпосередньо призводить до покращення загальної якості продукції [39,43,44].

Один із можливих шляхів реалізації комбінованого приводу — використання серійних електрогідравлічних клапанів, технічні параметри яких відповідають вимогам комбінованих віброзбуджувачів:

- частота спрацювання повинна бути до 50 Гц;
- витрата рідини через клапан має становити 100 л/хв або більше;
- тиск живлення гідросистеми має бути 10 МПа.

Переваги гібридної системи

Комбінований привод забезпечує поєднання найкращих характеристик від обох систем. Відомо, що гідравлічні збуджувачі здатні генерувати значні робочі

зусилля при істотно менших розмірах порівняно з іншими аналогами. Електромагнітні збуджувачі, у свою чергу, дозволяють досягати вищих частот коливань та забезпечують просте програмування відтворення вібрації відповідно до заданого закону. Таким чином, комбінований привід дозволяє зберегти необхідну потужність, одночасно забезпечуючи легкість і гнучкість регулювання параметрів вібрації. Важливою перевагою є можливість інтеграції цього приводу на вже наявне вібраційне обладнання (наприклад, стенди або машини) без значних конструктивних переробок, використовуючи лише спеціальні перехідні плити.

На основі аналізу останніх наукових досліджень і, ми встановили ключові переваги та недоліки існуючого вібраційного обладнання та різних типів віброзбуджувачів.

Віброзбуджувач відцентрового типу має низку переваг, які сприяли його широкому поширенню. До них належать: простота конструкції, відносно низька вартість виготовлення, а також легкість реалізації плавного або ступінчастого регулювання частоти вібрацій.

Водночас, відцентрові віброзбуджувачі мають і недоліки. До них зараховують відносно невеликий експлуатаційний ресурс, який значною мірою залежить від якості використаних матеріалів та виробів, точності виготовлення і складання окремих деталей, а також від правильності експлуатації та догляду. Крім того, складною проблемою є незалежне регулювання частоти та амплітуди вимушених сил, що обмежує їхню гнучкість у деяких технологічних процесах. Ще одним недоліком є відносно велика тривалість перехідного процесу під час зупинки (гальмування) [25,43,44].

Пневматичні віброзбуджувачі, що працюють на енергії стисненого повітря, займають значну нішу на ринку, що зумовлено такими позитивними якостями:

- дозволяють експлуатацію в умовах, де існує ризик вибуху;
- регулювання амплітуди та частоти вібрацій є порівняно нескладним і здійснюється за допомогою простої дросельної системи;

- діапазон робочих частот є широким: від 0 до 500 Гц;
- дозволяють значно змінювати амплітуду та силу, включно з досягненням високих робочих показників.

Ключовими перевагами електромагнітних віброзбуджувачів є:

- легкість регулювання амплітуди коливань та можливість коригування під час роботи пристрою, що робить їх ідеальними для автоматизованих систем управління продуктивністю;
- високі показники надійності та довговічності, оскільки в їхній конструкції немає рухомих деталей, схильних до тертя;
- можливість паралельної роботи декількох збуджувачів в одній установці без зовнішньої синхронізації (вони автоматично синхронізуються від загальної мережі), це дозволяє рівномірно розподілити збуджувальну силу вздовж пружного елемента в одному або двох вимірах.

Застосування кількох віброзбуджувачів також уможливорює створення складних і різноманітних траєкторій вібрації [43,45,46].

У порівнянні з іншими аналогами, електромагнітні віброзбуджувачі мають негативні сторони:

- велика питома маса (маса на одиницю збуджувальної сили);
- потреба у великій кількості електротехнічних матеріалів та пружинної сталі;
- значна зміна амплітуди вібрації при коливанні робочого навантаження, що є наслідком їхньої роботи в резонансному режимі;
- обмеження амплітуди переміщення — її величина встановлюється допустимими межами повітряного зазору між серцевиною електромагніта та якорем.

Електродинамічні віброзбуджувачі мають свої обмеження: складна конструкція (характерно для високопотужних пристроїв); низька стійкість до несприятливих зовнішніх умов експлуатації; у певних конструкціях спостерігається утворення значних магнітних полів розсіювання [45,46,47].

Пневматичні віброзбуджувачі, що працюють на базі енергії стисненого повітря, мають такі негативні сторони: складність точного розрахунку їхніх динамічних характеристик (частоти, амплітуди); брак простих інженерних методик для оцінки руху; інтенсивний шум під час функціонування; і суттєві втрати тиску у системі через низьку густину робочого середовища (повітря).

Однією з ключових проблем гідравлічних машин є витік робочої рідини, який відбувається через технологічні проміжки між поршнем і стінками циліндра, а також через ущільнення штока. Іншою проблемою є перегрів гідравлічної рідини, спричинений роботою в обмеженому (замкненому) об'ємі. Серед інших недоліків виділяють обернену кореляцію: збільшення амплітуди коливань супроводжується зниженням їхньої частоти, а також висока складність керування та налагодження цих віброзбуджувачів.

Пульсаційні віброзбуджувачі з насосами-пульсаторами мають основні переваги, які полягають у точній реалізації заданих параметрів частоти та амплітуди поршня виконавчої ланки. Це є приводом об'ємного типу.

Амплітуда руху штока робочого циліндра визначається об'ємом рідини, що нагнітається поршнями насоса-пульсатора, і залежить від конструктивних співвідношень машини, будучи при цьому незалежною від зовнішнього робочого навантаження. До додаткових позитивних характеристик належать: велике зусилля, що генерується (яке є значно вищим порівняно з іншими віброзбуджувачами з урахуванням їхніх розмірів); спрощені схеми підключення; універсальність застосування у різних умовах та середовищах; та широкий діапазон робочих частот [45,46].

Гідроімпульсний привод характеризується високими показниками створюваного зусилля (які можуть сягати 100 кН, залежно від умов застосування), що досягається при невеликих габаритах. Його переваги доповнюються низьким робочим тиском у гідравлічній магістралі (до 10 МПа), використанням електродвигунів низької потужності (до 5 кВт) та гнучкістю параметричного налаштування.

1.6. Висновки до 1 розділу

Проведений аналіз методів і пристроїв для деформаційного зміцнення деталей сільськогосподарських машин дозволив сформулювати низку ключових висновків щодо механізмів їхнього зношення та найбільш перспективних шляхів підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробної техніки.

Експлуатація робочих органів ґрунтообробних машин відбувається в умовах комбінованого впливу, де абразивне зношування є механізмом, який становить понад 60% від загального обсягу втрати працездатності деталей. Критичними наслідками інтенсивного зношення, особливо в зонах носка та різальних кромek лемешів і лап, є збільшення тягового опору та зниження стабільності руху агрегату, що вимагає розробки ефективних технологій відновлення.

Для реалізації поставленої мети у дисертаційній праці є розробка гідроімпульсного пристрою для зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин сільськогосподарського призначення. Було проаналізовано наукові доробки авторів за цією тематикою: Іськович-Лотоцький Р.Д., Атаманюк В.В., Обертюх Р. Р., Архипчук М. Р., Іванчук Я.В., Веселовський Я. П., Яцюк Р.А., Севостьянов І.В., Зелінська О. В., Лопатько К.Г.

Аналізуючи відповідні літературні джерела було:

- проаналізовано зміни геометричних параметрів і основні механізми зношування робочих органів ґрунтообробної техніки. Аналіз зносостійкості робочих органів залежить від багатьох чинників, серед яких головними є механічні навантаження, тип і склад ґрунту, фізико-механічні властивості матеріалів та експлуатаційні умови, зокрема швидкість руху агрегатів.

- подано сучасні методи відновлення зношених робочих органів ґрунтообробних машин, розглянуто методи пластичної деформації для відновлення геометричних параметрів робочих органів, що включають вальцювання, штампування та кування. Установлено, що застосування

поверхневої пластичної деформації створює багатоточкові та лінійні дефекти кристалічної решітки, підвищуючи стійкість поверхневих шарів до зношування.

- висвітлено класифікацію й особливості застосування методів поверхневого пластичного деформування. Методи ППД підвищують зносостійкість, втомну міцність та корозійну стійкість деталей машин.

- проаналізовано типи і конструкції віброзбуджувачів для забезпечення ППД. Використання різних типів віброзбуджувачів, таких як механічні, гідравлічні, пневматичні та електромагнітні, надає великого потенціалу для удосконалення технологій обробки та випробувань матеріалів. Зокрема комбіновані гідроелектричні віброзбуджувачі дозволяють досягти високої ефективності завдяки поєднанню переваг гідравлічного та електромагнітного приводів.

Динамічні методи ППД, зокрема статично-імпульсна обробка, мають значний потенціал для локального зміцнення деталей за рахунок керованого імпульсного впливу та зменшення спотворень ударного імпульсу, що забезпечується статичним підтиском інструменту. Використання пневматичних та гідравлічних пристроїв для реалізації динамічних методів ППД є актуальним інженерним завданням для забезпечення контрольованого та ефективного процесу зміцнення деталей сільськогосподарської техніки.

Результати аналізу обґрунтовують необхідність подальших досліджень і розробки вдосконалених технологій та пристроїв для деформаційного зміцнення деталей сільськогосподарських машин, зокрема на основі динамічних методів поверхневого пластичного деформування, для підвищення їхньої надійності та довговічності в умовах інтенсивної експлуатації [14].

2. КОМПОНУВАННЯ ТА КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ ГІДРОІМПУЛЬСНОГО ПРИВОДУ

2.1. Функціонування та вимоги до гідроімпульсного приводу

Гідроімпульсний привод, призначений для забезпечення ефективного функціонування вібраційних і віброударних машин, повинен відповідати таким основним вимогам [26,27,40,42]:

- для забезпечення максимальної жорсткості гідросистеми машини, сумарний об'єм напірної порожнини приводу повинен бути зведений до мінімуму, враховуючи заданий умовний прохід гідравлічних каналів;
- гідросистема приводу має бути оснащена ефективним охолоджувачем, який забезпечуватиме відведення надлишкової теплоти, що виникає внаслідок високочастотних коливань тиску рідини з великою амплітудою;
- через високу частоту імпульсів тиску зі значною амплітудою встановлення фільтрів у напірній гідролінії приводу є недоцільним. Фільтри з умовним проходом, що відповідає параметрам напірної гідролінії, створюють значний опір потоку робочої рідини, тоді як застосування фільтрів із підвищеною пропускною здатністю призводить до збільшення сумарного об'єму напірної порожнини, що негативно впливає на ефективність системи;
- у приводах вібраційних машин із максимальною амплітудою коливань виконавчого органу, яка не перевищує 2 мм, не рекомендується використовувати рідинні циклові гідроаккумулятори. Це пояснюється тим, що їхнє застосування збільшує початковий об'єм напірної порожнини, що унеможливорює реалізацію високочастотного режиму вібраційного навантаження на виконавчий орган;
- гідролінії, які з'єднують ГІТ із виконавчим двигуном та цикловим гідроаккумулятором, повинні бути максимально короткими. Це дозволить

мінімізувати енергетичні втрати імпульсу тиску під час роботи ГПТ, забезпечуючи підвищення ефективності системи;

- запірні елементи ГПТ повинні мати мінімально можливий робочий хід, який забезпечує пропуск розрахункової кількості рідини з допустимою швидкістю потоку у момент спрацьовування. Це сприяє оптимальному функціонуванню привода без перевищення енергетичних втрат;

- конструкція гідроімпульсного привода ГПТ повинна забезпечувати стабільність заданих параметрів амплітудно-частотної характеристики, враховуючи зміну властивостей робочої рідини, що виникає внаслідок її нагрівання під час тривалої експлуатації привода;

- конструктивне виконання та загальна компоновка привода мають бути розроблені таким чином, щоб забезпечити його простоту в керуванні, зручність у проведенні технічного обслуговування, ремонту та можливість швидкого переналаштування на інші режими роботи, зберігаючи при цьому високу ефективність і надійність системи.

Дотримання заданих технічних і технологічних вимог для гідроімпульсних приводів можна забезпечити шляхом реалізації таких конструктивних і технологічних заходів [42,46]:

1. Для мінімізації сумарного об'єму напірної порожнини гідросистеми приводу, напірні гідравлічні канали виконуються максимально короткими. Це досягається шляхом організації внутрішніх гідравлічних комунікацій у вигляді системи отворів, інтегрованих у так званий «розподільний паралелепіпед (плиту)». До граней цієї плити стиковим способом кріпляться всі основні гідроапарати приводу, зокрема виконавчий гідродвигун, електрогідравлічний клапан, регулятор потоку, розподільник, запобіжний клапан та інші елементи. Така конструкція не лише зменшує об'єм системи, але й підвищує її компактність, знижує енергетичні втрати та сприяє спрощенню обслуговування і ремонту.

2. Гідронасос приводу разом із приводним електродвигуном встановлюється на спеціальній платформі, яка закріплюється на станині поблизу

розподільного паралелепіпеда. Платформа оснащується механізмами точної орієнтації, такими як гвинтові або клинові пристрої, що забезпечують точне позиціонування напірного отвору гідронасоса відносно вхідного отвору розподільного паралелепіпеда. Це рішення дозволяє знизити втрати енергії та забезпечити надійність з'єднання, що важливо для стабільної роботи привода. Крім того, таке компонування сприяє зручності обслуговування, зменшує вібрації та спрощує налаштування системи.

3. Захист гідросистеми приводу від забруднень забезпечується встановленням фільтра на всмоктувальній гідролінії гідронасоса. Це запобігає потраплянню сторонніх часток у робочу рідину, що зменшує ризик зносу компонентів системи та підвищує її надійність і довговічність.

4. Охолодження робочої рідини рекомендується здійснювати за допомогою охолоджувальних змішувачів, інтегрованих у зливний відсік гідробаку. Така конструкція сприяє ефективному тепловідведенню, зменшуючи ризик перегріву рідини під час тривалої роботи приводу та забезпечуючи стабільність його параметрів.

5. Для ГПІ із номінальним тиском запуску $p_l \leq 12,5$ МПа доцільно використовувати шестеренні гідронасоси, наприклад, типу НШ, які відрізняються низькою чутливістю до змінного тиску з великою амплітудою імпульсів. У разі, якщо $p_l \geq 12,5$ МПа, рекомендується застосовувати плунжерні гідронасоси, оснащені пристроями для розвантаження від змінної компоненти тиску. Це забезпечує надійну роботу системи, знижує механічні навантаження на насос та збільшує його експлуатаційний ресурс.

6. Для забезпечення у процесі високочастотного режиму навантаження технологічного обладнання з амплітудою вібрації, що дорівнює або перевищує 2 мм, доцільно використовувати циклові пружинні гідроаккумулятори. Ці пристрої оснащуються регуляторами тиску зарядки, які виконують функцію регулювання попередньої деформації пружин, що забезпечують навантаження на плунжер гідроаккумулятора. Завдяки такому дизайну гідроаккумулятори цього типу забезпечують незначні зміни в загальному об'ємі напірної порожнини, а

також підтримують стабільну гідравлічну жорсткість системи приводу, що є критично важливим для стабільної роботи технологічного процесу без втрат ефективності. Упровадження таких гідроаккумуляторів також дозволяє поліпшити реакцію системи на коливання навантаження і підвищити загальну надійність роботи обладнання.

7) Блок керування ГП та підсилювач електричного струму потрібно розташовувати в ергономічному та доступному для користувача місці, де зручно здійснювати керування. Крім того, важливо, щоб ці елементи були надійно захищені від вібрацій, механічних впливів та різноманітних електричних шумів, що можуть негативно впливати на їхнє функціонування і загальну продуктивність системи. Наявність додаткових елементів захисту, таких як амортизаційні підкладки або екрани, може суттєво підвищити їхню стабільність та довговічність.

Результатом переміщення золотника є перетікання робочої рідини з нагнітальної порожнини через внутрішні канали електрогідравлічного клапана та виконавчу гідролінію в робочу порожнину виконавчого гідроциліндра. Одночасно відбувається розрядка циклового гідроаккумулятора, що спричиняє переміщення поршня виконавчого циліндра. Це переміщення фіксується датчиком переміщення D_3 , а значення тиску у виконавчій гідролінії контролюється датчиком тиску D_2 , забезпечуючи точний моніторинг і регулювання роботи приводу [44,48,49].

Після заданого проміжку часу з моменту подачі сигналу на електромагніт електрогідравлічного клапана (ЕМЕК), блок керування (БК) генерує наступний керівний сигнал, який надходить на ЕМЕК. Це забезпечує переміщення якоря електромагніта ЕК і через жорсткий штовхач переміщення золотника ЕК у крайнє ліве положення. У результаті припиняється подача рідини з нагнітальної гідролінії в систему, а робоча рідина з порожнини виконавчого гідроциліндра починає витікати через виконавчу гідролінію та внутрішні канали ЕК у бак. Після цього цикл роботи повторюється, забезпечуючи безперервне функціонування гідроімпульсного приводу.

Застосування блоку керування, а також датчиків тиску D_1 , D_2 та переміщення D_3 , дозволяє здійснювати моніторинг змін параметрів тиску в приводі та контролювати переміщення штока виконавчого гідроциліндра. Це забезпечує можливість вносити необхідні корективи або змінювати робочі параметри технологічного процесу дистанційно та безпосередньо в режимі реального часу, що підвищує точність і ефективність роботи приводу [48,49,51].

У процесі аналізу динаміки гідроімпульсного приводу робочий цикл можна умовно поділити на такі етапи:

- 1) нарощування тиску в нагнітальній порожнині до встановленого рівня p_1 ;
- 2) надходження електричного сигналу з блоку керування до електромагніта електрогідравлічного клапана;
- 3) зміщення якоря електромагніта та відповідне переміщення золотника електрогідравлічного клапана у праве крайнє положення, відкриття каналу, через який рідина надходить із нагнітальній гідролінії до виконавчої, що супроводжується рухом поршня у виконавчому гідроциліндрі;
- 4) повне відкриття каналу, через який рідина переходить з нагнітальній гідролінії в робочу, супроводжується зниженням тиску в нагнітальній гідролінії та розрядкою циклового гідроаккумулятора;
- 5) надходження електричного імпульсу з блоку керування на електромагніт електрогідравлічного клапана;
- 6) Зміщення якоря електромагніта та відповідне переміщення золотника електрогідравлічного клапана в ліву позицію, закриття каналу, через який рідина виходить з нагнітальній в робочу гідролінію, а також відкриття каналу для витікання рідини з робочої порожнини під впливом технологічного зусилля на поршень виконавчого циліндра, що спричиняє її потік у бак;
- 7) Постійний моніторинг зміни тиску та переміщення поршня виконавчого гідроциліндра за допомогою датчиків.

2.2. Структурна схема та принцип дії пресу для реалізації поверхнево-пластичної деформації

Під час поверхневого деформування в матеріалі одночасно відбуваються кілька процесів, що сприяють зміцненню та покращенню властивостей металу. До них належать трансформація внутрішньої структури, здрібнення розміру зерен та індукція залишкових напруг стиску в обробленому шарі. Ці напруги стиску формуються в результаті розвитку зсувних деформацій у кристалічній структурі. Сукупність усіх цих змін безпосередньо впливає на робочі характеристики виробів [48,49,49].

Поверхнєве пластичне деформування (ППД) спрямоване на збільшення міцності зовнішнього шару виробу. Важливою особливістю є те, що цей процес відбувається без утворення стружки.

Метод ППД базується на здатності металу поглинати деформацію, зберігаючи при цьому цілісність своєї поверхні. Ця технологія є одним із найбільш доступних та ефективних способів підвищення надійності машинних деталей. У результаті застосування ППД відбувається зростання твердості та міцності поверхні, формуються сприятливі залишкові стиснені напруги, знижується шорсткість поверхні та збільшується радіус заокруглення вершин мікровиступів, а також змінюються інші критично важливі параметри.

Розроблено принципову схему пресу з електрогідравлічним керуванням для формоутворення деталі, яка зображена на рисунку 2.1 та складається з персонального комп'ютера (ПК) (1), до якого приєднано через аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) (2) блок керування (БК) (3). До АЦП підключений датчик переміщення (13), а також датчик тиску (6). БК з'єднаний електромагнітом електрогідравлічного клапана-пульсатора (7). Датчик переміщення (13) нерухомо закріплений через жорсткий спеціальний тримач (14) на плиті (12). Плита (12) закріплена на опорах (10), які встановлено на плиті опорній (8), яка встановлена на вібропоглинальних пружинах (5) та вібропоглинальній підлозі (4).

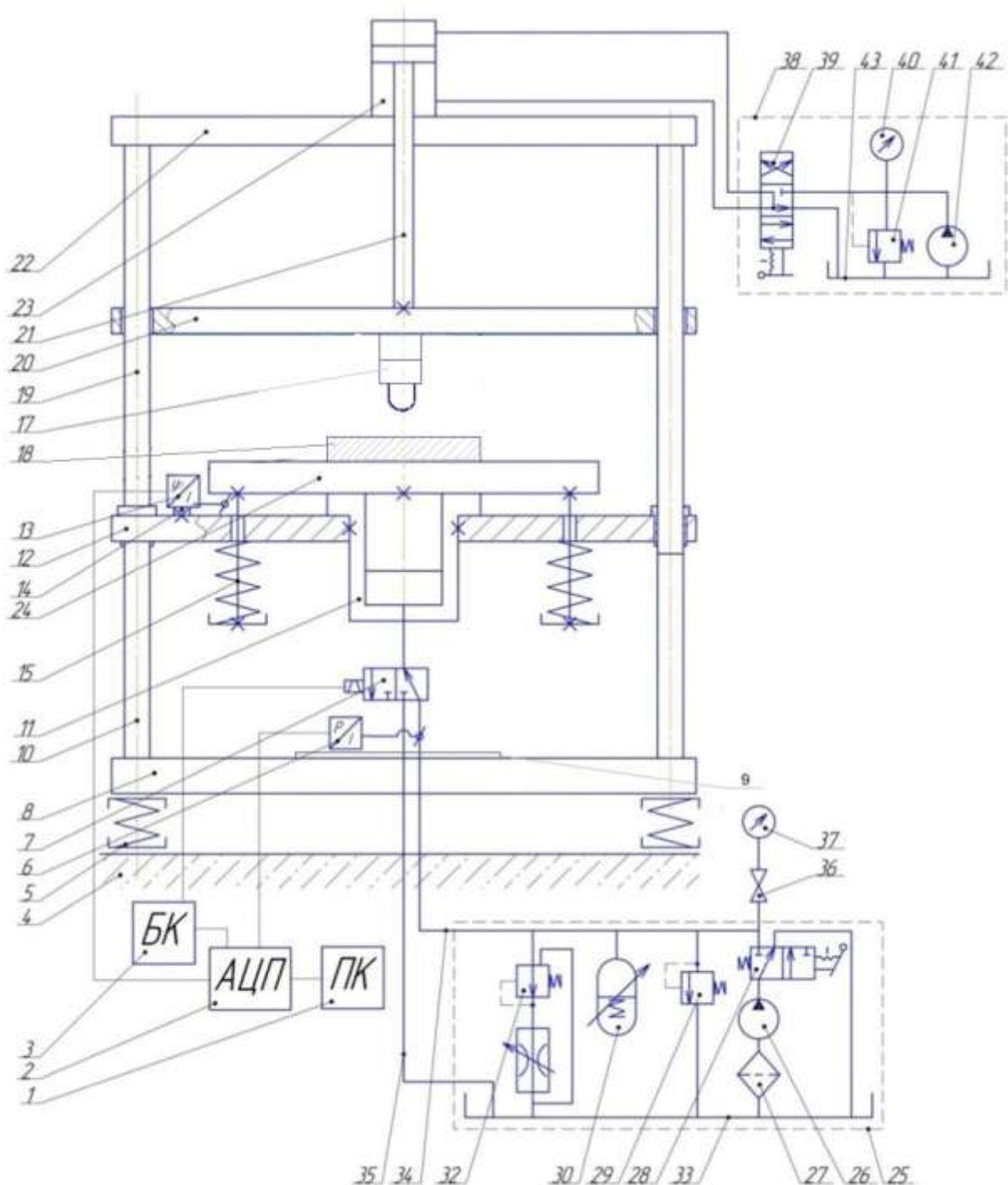


Рисунок 2.1 – Принципова схема пресу з гідроімпульсним приводом: 1 – ПК – персонального комп'ютера; 2 – АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; 3 – БК – блок керування; 4. – вібропоглинальна підлога; 5 – вібропоглинальні пружини; 6 – датчик тиску; 7 – електромагніт електрогідравлічного клапана-пульсатора; 8 – плита опорна; 9 – плита; 10 – опори; 11 – гідроциліндр; 12 – плита; 13 – датчик переміщення; 14 – жорсткий спеціальний тримач; 15 – зворотні пружини; 16 – нижня частина форми; 17 – ударник; 18 – деталь; 19 – напрямні опори; 20 – траверса; 21 –

шток; 22 – перемичка; 23 – гідроциліндр; 24 – віброплита; 25 – гідравлічна станція; 26 – гідронасос; 27 – фільтр; 28 – розподілювач потоку рідини; 29 – клапан запобіжний; 30 – гідроаккумулятор; 32 – переливний клапан; 33 – бак; 34,35 – гідравлічні канали; 36 – регулятор потоку рідини; 37 – манометр; 38 – гідравлічна станція; 39 – гідравлічний розподілювач; 40 – манометр; 41 – клапан запобіжний; 42 – гідронасос; 43 – бак

Джерело: [51]+ сформовано автором

На плиті (9) також нерухомо встановлено гідроциліндр (11), шток якого нерухомо з'єднаний з віброплитою (24), яка за допомогою зворотніх пружин (15) притискається до гідроциліндра (11), та на якій встановлена нижня частина форми (16), яка рухомо з'єднана з ударником (17), яка кріпиться до траверси (20), яка жорстко з'єднана зі штоком (21) гідроциліндра (23) та встановлена на напрямних опорах (19). Гідроциліндр (23) закріплений на перемичці (22), яка встановлена на напрямних опорах (19). Гідроциліндр (23) через гідравлічні шланги з'єднаний з гідравлічною станцією (38), яка містить бак (43), гідронасос (42), манометр (40), клапан запобіжний (41) та гідравлічний розподілювач (39).

До гідроциліндра (11) нерухомо кріпиться електрогідравлічний клапан-пульсатор (7), який через гідравлічні канали (34) та (35), з'єднаний з гідравлічною станцією (25), яка містить бак (33), розподілювач потоку рідини (28), гідронасос (26), фільтр (27), клапан запобіжний (29), гідроаккумулятор (30), переливний клапан (32), манометр (37) та регулятор потоку рідини (36). В канал що з'єднує клапан пульсатор (7) та гідроциліндр (11) вмонтовано датчик тиску (6).

Пристрій працює таким чином [51]: у нижню частину форми (16) завантажуються деталь (18), яка в подальшому притискається верхньою частиною форми (17). Для того, щоб верхня частина форми (17) в процесі обробки залишалась у своєму початковому положенні, верхня її частина фіксується (20), переміщення якої відбувається штоком (21) гідроциліндра (23), який живиться від гідростанції (38).

Процес вібраційного наклепу заготовки (18) відбувається шляхом дії на неї циклічних імпульсних навантажень з боку вібростола (24) – заданої амплітуди та сили, де кріпиться нижня форма (16). Імпульсний тип навантаження на вібростіл (24) передається через шток гідроциліндра (11) з його робочої порожнини.

При керуванні значення тиску у нагнітальній гідролінії (34), який створюється гідростанцією (25), заміряється і передається через АЦП (2) на БК (3). При досягненні заданого тиску p_1 у нагнітальній гідролінії (34) з БК на електромагніт електrogідравлічного клапана (7) подається сигнал, який через штовхач переміщує золотник у «робоче» положення. За рахунок цього відбувається перетікання рідини з нагнітальної гідролінії (34) у виконавчу порожнину гідроциліндра (11) і відповідне переміщення вібростола (24) через шток гідроциліндра (11). Імпульсний тип навантаження виникає за рахунок передачі імпульсу енергії рідини, що акумулювався у рідині шляхом її стискування до заданого тиску p_1 у нагнітальній гідролінії (34). Після того як відбулось перетікання рідини у виконавчу порожнину гідроциліндра (11), тиск рідини у нагнітальній порожнині (34) знизився до значення p_0 , при якому з БК (3) на електромагніт електrogідравлічного клапана (7) подається сигнал, який через штовхач переміщає золотник у «закрите» положення, і тиск у нагнітальній гідролінії (34) знову починає зростати. Рідина з робочої порожнини гідроциліндра (11) через зливну гідролінію витікає у бак (33) гідросистеми (25), що супроводжується переміщенням вібростола (24) і штока гідроциліндра (11) у початкове положення завдяки зворотнім пружинам (15) та зусиллю, що діє з боку заготовки (18). Потім цикл повторяється.

Перетікання рідини з нагнітальної гідролінії (34) у робочу порожнину гідроциліндра (11) та витікання рідини з робочої порожнини гідроциліндра (11) через зливну гідролінію (35) у бак (33) гідростанції (25) відбувається за заданим законом, який залежить від частоти та сили сигналів, що подаються з БК (3) на електромагніт електrogідравлічного клапана (7), що забезпечує переміщення золотника у «робоче» чи «закрите» положення. При такому керуванні необхідно враховувати час, за який тиск у нагнітальній гідролінії досягає значення p_1 , що

дозволить забезпечити імпульсний тип навантаження на вібростолі (24), що буде обмежувати максимально можливу частоту подачі сигналів.

Для того, що збільшити максимально можливу частоту на вихідному сигналі з БК (3) на електромагніт електрогідравлічного клапана (7), регулюється сила сигналу, що регулює час перебування золотника електрогідравлічного клапана (7) у «робочому» чи «закритому» положенні, на відміну від симетричного при силі 50%, що додатково дозволяє розширити можливості електрогідравлічного клапана (7).

Регулювання сили вихідного сигналу з БК (3) також дозволяє регулювати амплітуду вібрацій вібростола (24), що фіксується датчиком переміщення (13), від робочого режиму вібропреса з електрогідравлічним керуванням, не змінюючи подачі рідини з гідростанції (25) у нагнітальну гідролінію (34).

Під час перетікання рідини з нагнітальної гідролінії (34) у робочу порожнину гідроциліндра (11) при двох типах керування шляхом переміщення золотника електрогідравлічного клапана (7) у «відкрите» положення, відбувається збільшення об'єму нагнітальної порожнини, що супроводжується зниженням тиску p до певного рівня, оскільки продуктивність насоса не дозволяє забезпечити постійну величину тиску p_1 на заданому рівні по всьому об'єму, що негативно впливає на вібраційне формоутворення [49,51,52].

Для цього у гідросистемі (25) передбачено гідроаккумулятор (30), щоб під час переміщення золотника електрогідравлічного клапана (7) у «відкрите» положення та відповідним перетіканням рідини з нагнітальної гідролінії (34) у робочу порожнину гідроциліндра (11) завдяки накопиченій енергії, що акумулювалась у гідроаккумуляторі (30) під час зростання тиску p до значення p_1 у нагнітальній гідролінії (34), забезпечити додатковим об'ємом рідини для уникнення вищевказаного зниження тиску при переміщенні золотника електрогідравлічного клапана (7) у «відкрите» положення у гідросистемі, що дозволить використовувати менш потужний насос та забезпечить плавність імпульсного типу навантаження.

Зарядка гідроаккумулятора (30) під час обох режимів керування відбувається у проміжок часу, коли золотник електрогідравлічного клапана (7) знаходиться між «закритим» і «відкритим» положенням (рис. 2.2).

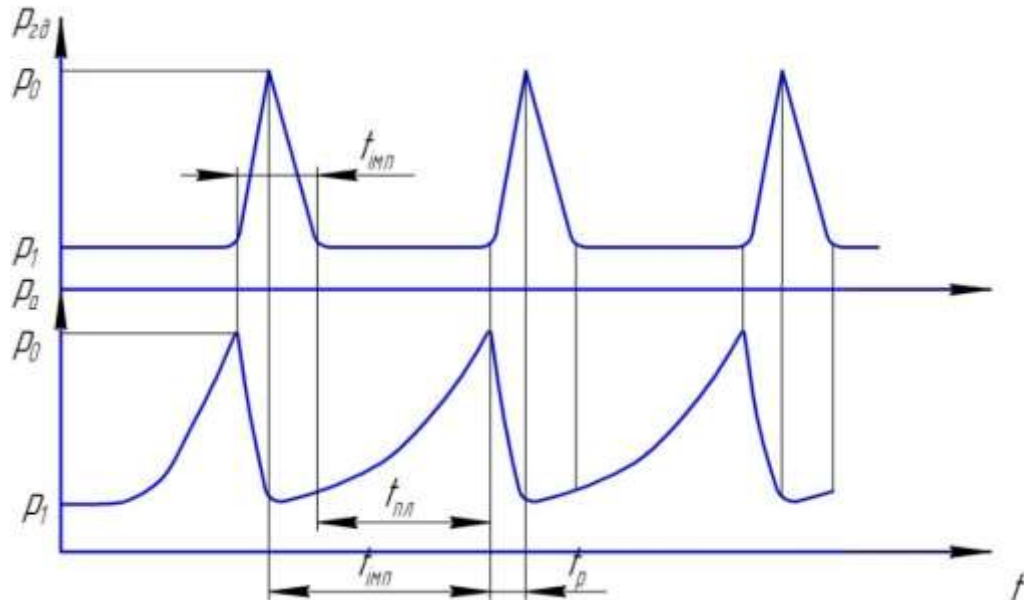


Рисунок 2.2 – Циклограма зміни тиску в гідроаккумуляторі (p_a) та в порожнині виконавчого гідроциліндра (p_{20}): де, t_{imp} – тривалість імпульсу; $t_{пл}$ – тривалість площадки постійного тиску між імпульсами; t_z , t_p – відповідно, час зарядки і розрядки гідроаккумулятора.

Джерело: [52]

Після аналізу різних типів електрогідравлічних клапанів, що представлено у таблиці 1.4, пропонуємо використати у ролі вібробуджувача преса з електрогідравлічним керуванням електрогідравлічний клапан (7) УЕГ.С-200 вітчизняного виробництва (додаток В).

Блок керування (3), що наведений на рисунку 2.3, був спеціально розроблений для керування електромагнітом електрогідравлічного клапан, який забезпечує необхідний режим роботи експериментального стенда.

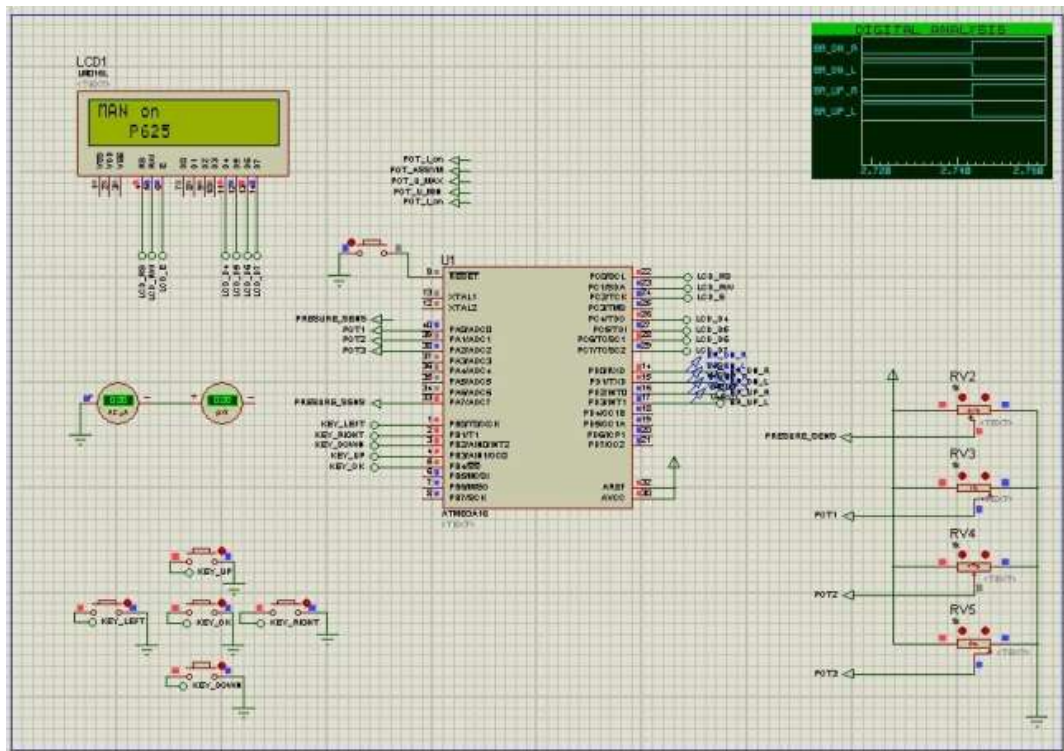


Рисунок 2.3 – Електрична схема блоку керування електромагнітом електрогідравлічного клапана

Джерело: [51]

Ця схема розроблена в середовищі ISIS, за допомогою якої можна проводити віртуальну симуляцію роботи заданої схеми, що з високою ймовірністю дозволяє прогнозувати силу та графік вихідного сигналу. Живлення блоку керування відбувається підключення його у загальну мережу 220 В з частотою 50 Гц через 12В блок живлення, що забезпечує надійне функціонування усього блоку керування. До БК (3) підключається датчик тиску (6), для можливості параметричного налаштування.

2.3. Конструктивні особливості гідроімпульсного пристрою для зміцнення деталей сільськогосподарських машин деформацією

Дослідження проводилися на спеціальному експериментальному стенді, доповненому вимірювальною технікою. Установка дозволяє оператору

контролювати тиск, налаштовувати режими вібраційного навантаження на ударний інструмент та записувати дані про тиск у реальному часі.

Початковим інформативним зразком було розглянуто стенд розроблений науковцем Обертюхом Р.Р. [51,52]

На рисунку 2.4 представлена схема експериментальної моделі гідроімпульсного пристрою для деформаційного зміцнення, разом із комплектом вимірювальної апаратури.

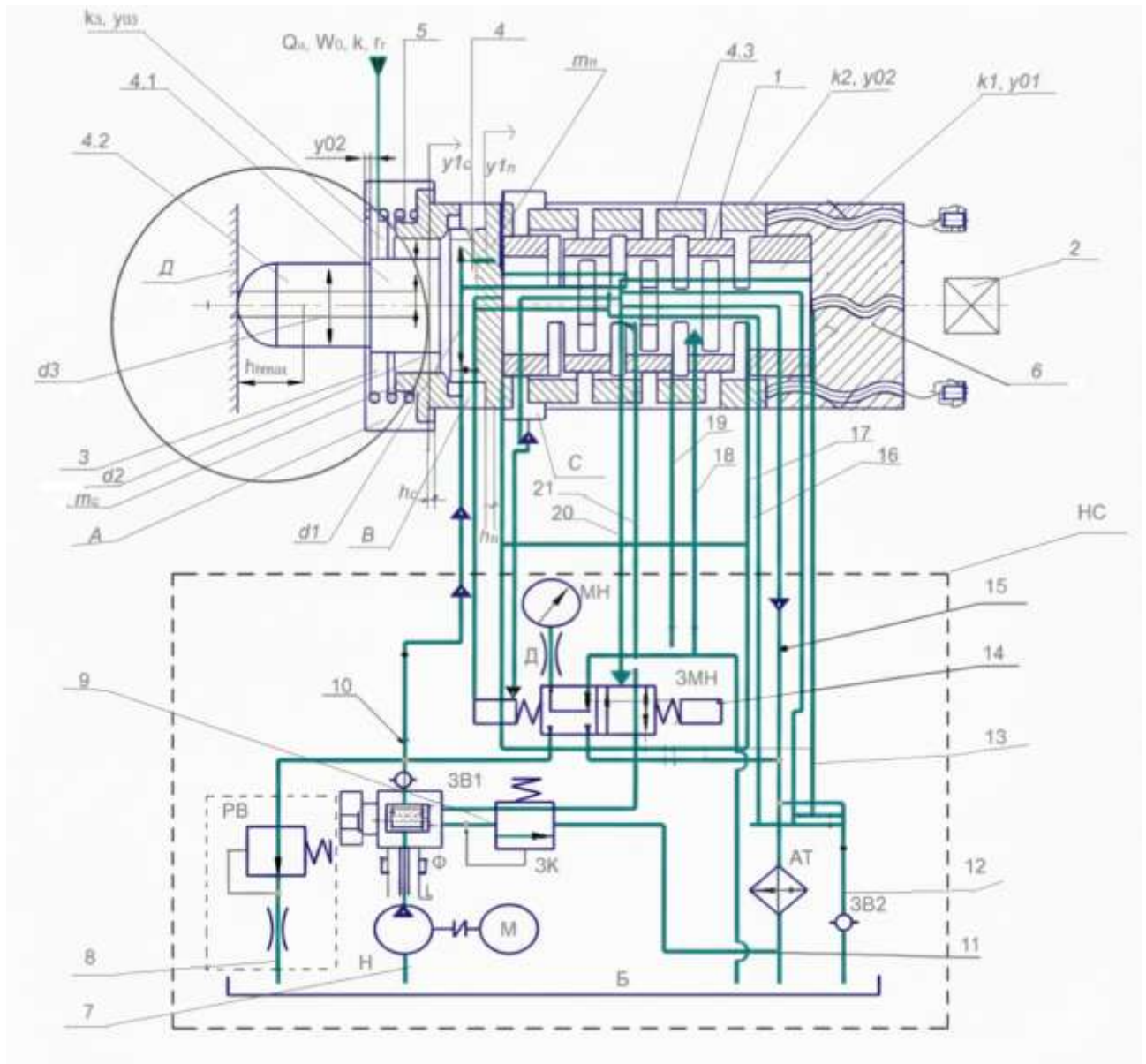


Рисунок 2.4 – Принципова гідрокінематична схема дослідного зразка гідроімпульсного пристрою для деформаційного зміцнення деталей:
1 – пружина; 2 – регулювальний гвинт; 3 – пружина; 4 – ударник; 4.1 – шток; 4.2 – ударний наконечник; 4.3 – пружна частина поршня; 5 – сідло; 6

– стакан; 7-21 – гідролінії; d_1, d_2 – діаметр; d_3 – діаметр штока; y_{02} – попередня деформація; h_d – додаткове перекриття; Q_n, W_0, k, ρ_r – подача енергоносія; k_1, y_{01} – жорсткість і попередня деформація пружини 1; k_2, y_{02} – жорсткість і попередня деформація пружної частини 4.3 поршня-ударника 4; k_3, y_{03} – жорсткість і попередня деформація пружини 3; m_n і m_c – відповідно, зведені маси поршня-ударника; h_{hmax} – максимальний хід поршня – ударника 1; y_{1c}, y_{1n} – початок (напрями) відліку прямого ходу, відповідно, сідла 5 та поршня – ударника 4; А – напірна порожнина; Б – бак; В – проміжна порожнина; Д – оброблювальна деталь; С – зливна порожнина; Б – бак; Ф – набірний фільтр; ЗВ1, ЗВ2 – зворотний клапан; АТ – радіатор; ЗК – запобіжний клапан; РВ – регулятор витрат; Н – гідронасос; НС – насосна станція

Джерело: сформовано автором

Робота стенда організована наступним чином: електродвигун через муфту запускає насос, який забирає робочу рідину (енергоносій) з бака (Б) через гідролінію (1). Далі рідина подається до досліджуваного гідроімпульсного пристрою через гідролінії (2, 3, 6), проходячи через напірний фільтр (Ф) та зворотний клапан (ЗВ1).

Злив відпрацьованого енергоносія відбувається через гідролінії (8) і (10), прямує через радіатор (АТ) для охолодження, і по гідролінії (11) повертається в бак (Б). У разі перевищення допустимого тиску в гідролінії нагнітання, рідина аварійно скидається в бак, минаючи радіатор (АТ), через лінію (12), зворотний клапан (ЗВ2) та гідролінію (13). Для контролю та стабілізації тиску в напірній магістралі встановлено запобіжний клапан (ЗК), який з'єднаний відповідними гідролініями (4) і (9).

Для фіксування миттєвого тиску в конструкції стенда передбачено манометр, що працює через гідророзподільник. Щоб забезпечити регулювання режимів вібронавантаження ударного інструмента, використовується регулятор витрати (РВ) з гідролініями (5) і (7).

Для проведення експериментальних досліджень заготовку (3) встановлюють у патрон верстата. Гідроімпульсний пристрій для деформаційного зміцнення деталей (ПВ) фіксується у різцетримачі універсального токарного верстата. Під час роботи зміна технологічного зусилля контролюється та здійснюється за допомогою регуляторів (15) і (16) [49,52,53].

Реєстрація робочих параметрів експериментального гідроімпульсного пристрою, що використовується для деформаційного зміцнення, під час проведення дослідів здійснюється за допомогою осцилографування. Для цього використовується струмовий датчик переміщення (Д1) та датчик тиску (Д2). Датчик тиску (Д2) підключений до напірної гідролінії (НР). Відповідно, датчик переміщення (Д1) фіксує рух поршня-ударника (18). Для забезпечення коректності вимірювань переміщення обов'язково повинен бути забезпечений зазор між датчиком (Д1) та спеціальною планкою (17).

Гідронасос (Н) разом із приводним електродвигуном, усім комплексом гідроапаратури та гідробаком (Б) інтегруються та встановлюються на загальній станині насосної станції (НС).

Процес підготовки дослідного зразка гідроімпульсного пристрою для деформаційного зміцнення до експериментів вимагає виконання наступних ключових етапів:

1. Провести вимірювання та коригування попередньої деформації пружних елементів гідроімпульсного пристрою.
2. Здійснити встановлення та надійне закріплення гідроімпульсного пристрою у різцетримачі верстата.
3. Розмістити комплекс вимірювально-реєструючої апаратури поруч із верстатом.
4. Виконати монтаж датчиків тиску та переміщення безпосередньо на корпусі гідроімпульсного пристрою.
5. Підключити датчики до комплексу вимірювально-реєструючої апаратури за допомогою відповідних кабелів.

6. Провести заземлення, налагодження та прогрівання вимірювально-реєструючої апаратури.
7. Виконати перевірку функціонування приводу, ГІТ та апаратури у режимі холостого ходу.
8. Здійснити налаштування підсилення сигналів, що надходять від датчиків, згідно з їхніми технічними характеристиками.
9. Провести пробні реєстрації динамічних параметрів приводу та ГІТ на різних режимах з метою вибору оптимальної часової розгортки для осцилограм зміни тиску в порожнинах приводу та осцилограм переміщень.

2.4. Вплив геометричної форми ударника на формозміну локальних зон зміцнення при поверхнево-пластичній деформації

Ударник гідроімпульсного пристрою є ключовим елементом, що безпосередньо взаємодіє з деталями, передаючи їм енергію гідроудару. Його ефективність і довговічність безпосередньо залежать від здатності протистояти значним навантаженням, що виникають при високошвидкісних зіткненнях. В умовах інтенсивних ударних впливів, особливо при багаторазових циклах навантаження-розвантаження, матеріал ударника піддається пластичній деформації, що призводить до незворотних змін його геометрії та властивостей [53,54,55]. Розуміння цих формозмін є критично важливим для оптимізації конструкції ударників, вибору матеріалів та прогнозування їхнього ресурсу.

Пластична деформація ударників виявляється у вигляді вм'ятин, викривлень, розплющування та інших змін початкової форми, які накопичуються з часом. Цей процес залежить від низки факторів, включаючи енергію удару, властивості матеріалу ударника (твердість, міцність, в'язкість), властивості оброблюваного матеріалу, а також геометричну форму самого ударника.

Розглянемо особливості формозмін для різних видів ударників:

- Сфера (кулька) (рис. 2.5): кулькові ударники завдяки своїй симетричній формі, мають рівномірний розподіл напружень при ідеальному центральному ударі.

Проте, у реальних умовах, особливо при нецентральному ударі або неоднорідності матеріалу, на поверхні кульки можуть утворюватися локальні вм'ятини та зрізи. Пластична деформація часто призводить до уплощення контактної поверхні, змінюючи початкову точкову взаємодію на площинну.

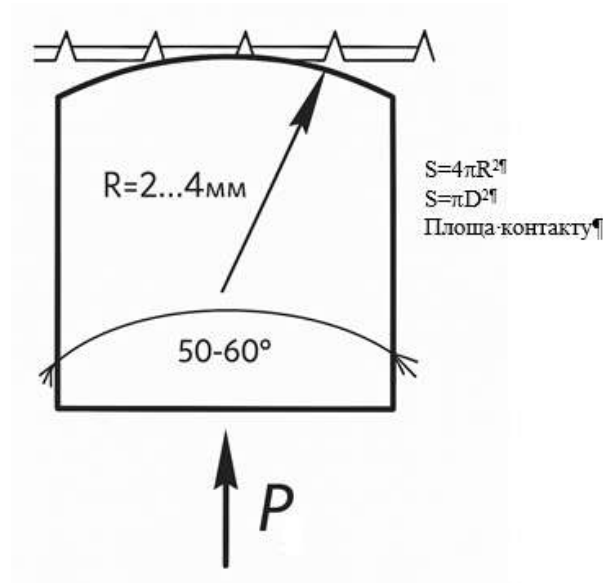


Рисунок 2.5 – Кульковий ударник

Джерело: сформовано автором

- Конус (рис. 2.6): конічні ударники концентрують енергію удару на меншій площі, що забезпечує високий питомий тиск. Це робить їх ефективними для перфорації та руйнування твердих матеріалів.

Проте, ця концентрація напружень робить вершину конуса особливо схильною до пластичної деформації. З часом вершина може тупитися, розплющуватися або навіть відколюватися, зменшуючи ефективність проникнення.

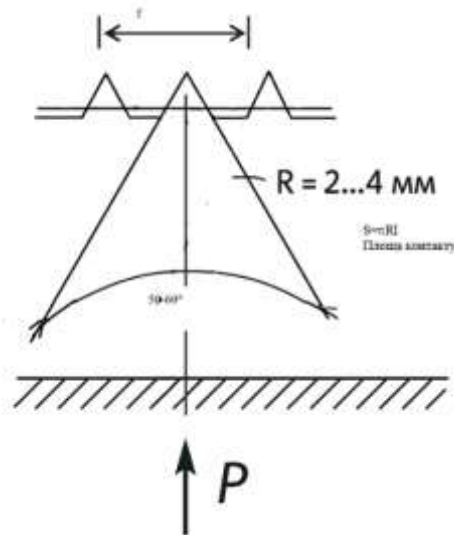


Рисунок 2.6 – Конічний ударник

Джерело: сформовано автором

- Закруглений конус (рис. 2.7): Цей тип ударника є компромісом між сферою та гострим конусом.

Закруглена вершина дозволяє зменшити пікові напруження, характерні для гострого конуса, водночас забезпечуючи кращу концентрацію енергії порівняно зі сферою. Пластична деформація закругленого конуса виявляється переважно в уплощенні та деградації форми закругленої частини, що може призводити до зміни динаміки удару та зменшення ефективності.

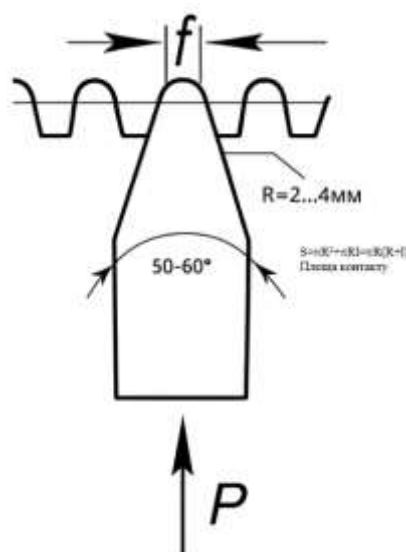


Рисунок 2.7 – Ударник з закругленою вершиною

Джерело: сформовано автором

- Трапеція (рис. 2.8): Ударники трапецієвидної форми використовуються для створення широких канавок або для обробки поверхні з більшою площею контакту.

Через їхню відносно велику контактну площу, пластична деформація може виявлятися у вигляді загального уплощення, викривлення бічних граней, або ж утворення виїмок по краях внаслідок концентрації напружень на межах контакту.

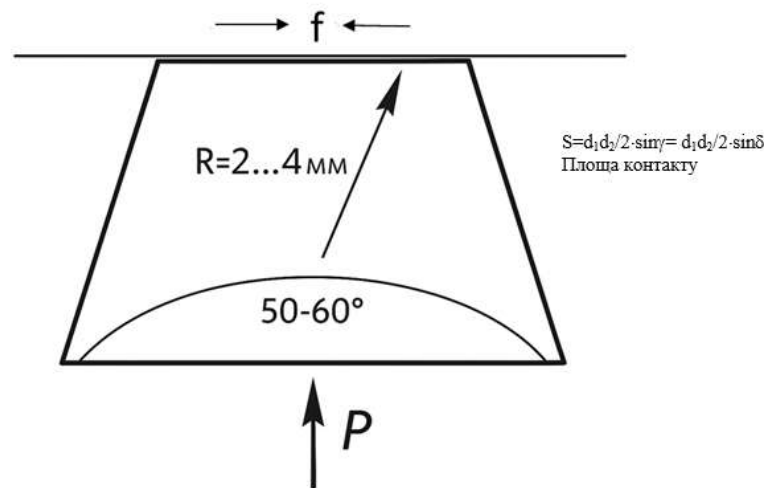


Рисунок 2.8 – Ударник трапецієвидної форми

Джерело: сформовано автором

Дослідження формозміни ударників з урахуванням пластичної деформації є важливим етапом у розробці та вдосконаленні гідроімпульсних пристроїв. Це дозволяє прогнозувати термін служби ударників, оптимізувати вибір матеріалів (наприклад, використання більш твердих сплавів, матеріалів з високою в'язкістю руйнування або спеціальних покриттів) та розробляти нові конструктивні рішення, що підвищують їхню стійкість до зносу та деформації [54,55,56].

Твердість металу впливає на тривалість роботи деталей і залежить від міцності деталі і стійкості поверхні до спрацювання. На твердість випробовують всі деталі ґрунтообробної техніки, щоб визначити ступінь довговічності. Визначали ступінь деформації поверхні металів при ударній дії сферичного ударника гідроімпульсного пристрою. При дії ударника змінюється характер деформаційного зміцнення твердості (рис. 2.9).

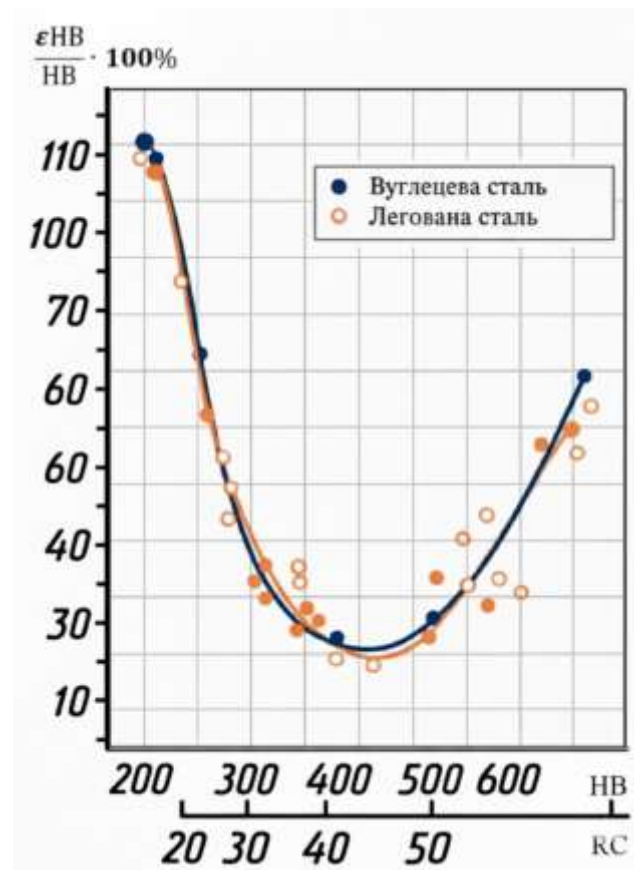


Рисунок 2.9 – Ступінь максимального наклепу для сталей 50 та 65Г

Джерело: сформовано автором

Зона впливу формозміни поверхні, що діє на оброблювальну деталь призводить до зміни розподілу наклепу та глибини заглиблення ударника (рис. 2.10, 2.11) [49,54,56].

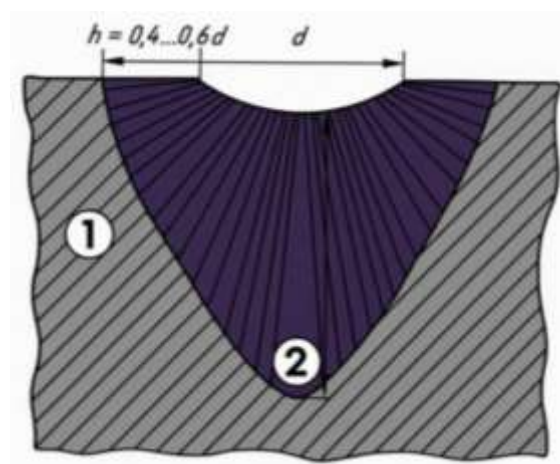


Рисунок 2.10 – Розподіл зон наклепу та їхня глибина при ударнику форми кулька: 1 – деталь 2 – зона деформації

Джерело: сформовано автором

Ударний вплив оцінюється на основі кінетичної енергії удару, прикладеної до інструмента або тіл, що беруть участь у роботі, та швидкісного режиму деформації.

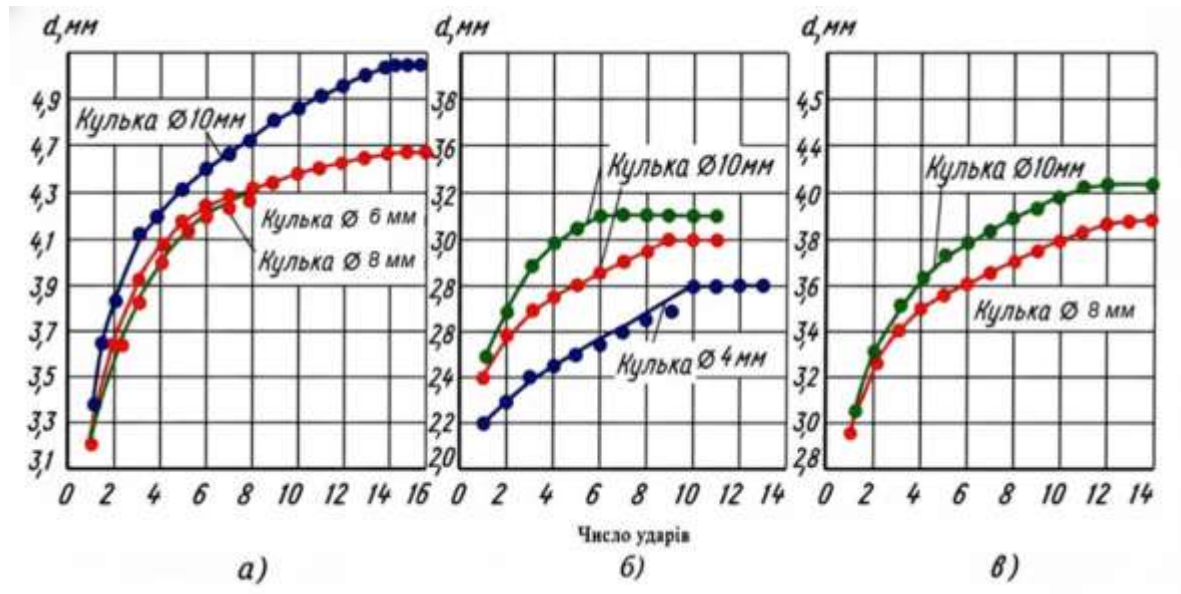


Рисунок 2.11 – Характер поширення наклепаної зони під поверхнею відбитка: а) сталь 10; б) сталь 50; в) сталь 65Г

Джерело: сформовано автором

Енергію удару можна генерувати кількома способами: наданням ударнику специфічної геометричної форми або забезпеченням необхідної твердості матеріалу; використанням тиску рідини (гідравлічна дія); застосуванням відцентрових сил; шляхом використання вібраційних коливань робочого середовища для передачі ударного імпульсу деформуючому інструменту.

Скупчення дислокацій відіграють ключову роль у зміцненні металів під час деформації. Коли від одного джерела генерується серія дислокаційних петель, що рухаються площиною ковзання, і перша дислокація наштовхується на бар'єр, то наступна дислокаційна петля, наближаючись до зупиненої, збільшує локальні спотворення кристалічної ґратки у місці контакту [54,55,56]. Спотворення, що виникають внаслідок взаємодії близько розташованих дислокаційних ділянок, поширюються у прилеглі області. Це веде до збільшення інтенсивності та розширення об'єму деформованої ґратки навколо цих скупчень.

2.5. Теоретичне обґрунтування параметрів гідроімпульсного пристрою для деформаційного зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин

Гідроімпульсні приводи для деформаційного зміцнення з робочою частотою до 100 Гц мають, на наш погляд, значні переваги перед альтернативними віброприводами. До цих переваг відносяться компактні розміри та широка можливість гнучкого налаштування параметрів вібронавантаження ударного елемента. Така гнучкість є критичною для забезпечення підбору найбільш оптимальних режимів при обробці деталей методом ППД. [54,57,58].

Конструктивні схеми гідроімпульсних пристроїв для деформаційного зміцнення можна умовно згрупувати у два класи:

- пристрої, що мають винесений (зовнішній) ГІТ;
- пристрої з ГІТ, інтегрованим безпосередньо у виконавчу ланку.

Для проектування та розрахунку даного пристрою необхідно дослідити його динамічні характеристики як теоретично, так і експериментально, попередньо створивши його математичну та динамічну моделі. Створення динамічної моделі гідроімпульсного пристрою, який має вбудований параметричний ГІТ, слід розпочати з розгляду його структурно-розрахункової схеми (рис. 2.4).



*Рисунок 2.12 – Загальний вигляд ударника гідроімпульсного приводу
Джерело: сформовано автором*

Для досягнення найменших габаритів пристрою, переважними є конструкції другого типу (з ГІТ, вбудованим у виконавчий механізм), особливо при зміцненні малогабаритних деталей (див. рис. 2.12). Вимога до мінімальних розмірів пристрою в першу чергу диктується необхідною енергією зміцнення, яку потрібно забезпечити при заданих швидкісних режимах, подачі та частоті ударів. Енергія зміцнення є головним критерієм для проектування та вибору силових елементів пристрою. Щоб зменшити загальні габарити, рекомендується комбінувати пружні елементи як самого ГІТ, так і ударника (виконавчої ланки).

Поршень-ударник (4), оснащений ударним наконечником (4.2) на штоку (4.1) (рис. 2.4), є головним силовим та розподільчим компонентом пристрою ГІТ.

Виконуючи функцію розподільної ланки ГІТ, поршень-ударник (4) використовує для герметизації фаскові та золотникові елементи. По суті, він є запірним механізмом однокаскадного ГІТ, що забезпечує генерацію імпульсів тиску на параметричному принципі. Фаска поршня-ударника (4) вступає в контакт із сідлом (5). Сідло (5) прилягає по діаметру до поверхні гільзи (на схемі відсутня), всередині якої рухається поршень-ударник (4). Взаємодія також відбувається з фаскою переходу поршня-ударника (4) від діаметра d_1 до діаметра d_2 , утворюючи лінійний контакт [54,58,59].

Коли поршень-ударник (4) встановлено в робоче положення, і створено попередню деформацію Δ_0 пружної частини (4.3) (яка є силовою частиною пристрою у вигляді прорізної пружини) та додаткової прорізної пружини (1), встановленої паралельно, поверхня поршня-ударника діаметром d_2 розташована на відстані додатного перекриття x_0 від зливних отворів гільзи пристрою. .

Тиск ініціації (відкриття) ГІТ регулюється пружиною (1) за допомогою регулювального гвинта (2), який знаходиться у стакані (6), а також за рахунок деформації пружної частини (4.3) поршня-ударника.

На структурно-розрахунковій схемі пристрою (рис. 2.4) додатково зазначено такі параметри та компоненти:

- Q_H : подача енергоносія (робочої рідини) від гідронасоса насосної станції (умовно не показана);

- $V_{\Sigma A}$: сумарний об'єм напірної порожнини приводу, що охоплює об'єм енергоносія в напірному рукаві насосної станції та початковий об'єм напірної порожнини A пристрою;
- E та p_A : відповідно, зведений модуль пружності енергоносія та потокове значення тиску енергоносія в напірній порожнині A ;
- C_1 та Δ_1 : жорсткість і попередня деформація пружини (1);
- C_{43} та Δ_{43} : жорсткість і попередня деформація пружної частини (4.3) поршня-ударника (4). Ця деформація створюється при кріпленні пристрою на верстаті таким чином, щоб між буртиком штока (4.1) та дном розточки корпуса пристрою відносно оброблюваної деталі (D) утворився зазор, який дорівнює δ_0 ;
- C_3 та Δ_3 : жорсткість і попередня деформація пружини (3);
- $m_{y\delta}$ і $m_{ci\delta}$: відповідно зведені маси поршня-ударника (до цієї маси включено $\approx 1/3$ маси пружної частини (4.3)) та сідла (5) (куди включено $\approx 1/3$ маси пружини (3));
- d_{um} : діаметр штока (4.2) поршня-ударника (4);
- h_{max} : максимальний робочий хід поршня-ударника (4);
- B і C : відповідно проміжна порожнина ГІТ та зливна порожнина пристрою, яка з'єднана рукавом (умовно не показаний) з баком (B) насосної станції приводу;
- x_c і $x_{y\delta}$: напрямки відліку (початок прямого ходу) відповідно сідла (5) та поршня-ударника (4) [54,58].

Цикл роботи гідроімпульсного пристрою для деформаційного зміцнення представлено та проаналізовано на базі умовної циклограми (рис. 2.13), яка відображає його функціонування.

Робочий цикл пристрою змодельовано за допомогою умовної циклограми (рис. 2.13), що відповідає максимальній частоті імпульсів тиску. Це моделювання базується на заданій подачі Q_H гідронасоса, об'єму $V_{\Sigma A}$ напірної порожнини та модулю пружності K енергоносія. Графічно представлено: динаміку тиску p_A у напірній порожнині, переміщення сідла x_c , та хід поршня $x_{y\delta}$, який є силовим і розподільчим елементом ГІТ.

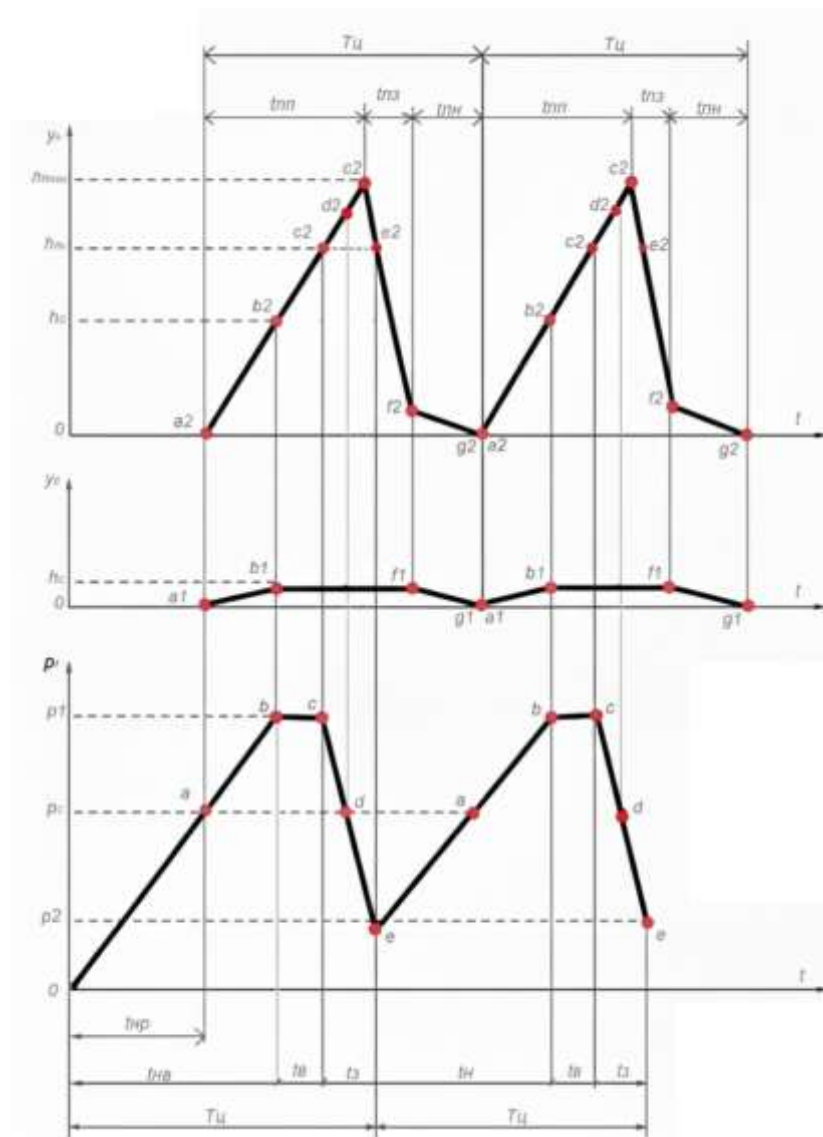


Рисунок 2.13 – Умовна циклограма робочого циклу пристрою

Джерело: сформовано автором

Циклограма відображає роботу двох початкових імпульсів, ігноруючи перехідний процес запуску системи, який є неминучим у реальній експлуатації. Зміни тиску від p_n до p_{max} та від p_n до p_{min} ідеалізовані як постійні значення. Крім того, на графіку показано перехідні процеси, що виникають при русі запірного елемента ГІТ та поршня пристрою.

Генератор імпульсів тиску активується (відкривається) відразу після посадки сидла на гільзу при досягненні тиску p_{max} у гідросистемі (з приростом p_{max} на невелику величину). На циклограмі цей момент відкриття ГІТ позначений як точка A_0 і точка C_0 .

Після відкриття ГІТ робочий тиск у напірній камері гідросистеми стабілізовано на рівні p_1 (ділянка bc кривої $p_r = f(t)$), допустимо, що запірний елемент ГІТ (поршень-ударник) здійснює розгін на ділянці, що відповідає додатному перекриттю h_d і частково $(2/3 \cdot h_{вг})$ на від'ємному перекритті $h_{вг}$ прямого ходу. У момент, коли додатне перекриття h_d поршнем-ударником пройдено (точка c_2 на кривій $h_{п} = f(t)$), а проміжна порожнина з'єднується зі зливною, тиск p_r спрямовується до рівня p_2 (ділянка e_2 кривої $p_r = f(t)$), проте поршень-ударник зберігає свій прямий рух, спричинений впливом тиску $p_r > p_2$ і за інерцією (ділянка $d_2c'_2$), це призводить до того, що тиск зменшується до рівня p_2 (у фактичному пристрої показник тиску може зменшитися до рівня $p_r < p_2$).

Динаміка кожного етапу циклу може бути описана за допомогою диференціальних рівнянь, які моделюють рух ланок пристрою, а також рівнянь, що описують витрату енергоносія.

З метою оптимізації математичного та динамічного опису робочого циклу з восьми етапів, ці етапи доцільно згрупувати у два великі періоди:

- період прямого ходу мас m_c і m_n – етапи 1...5;
- період зворотного ходу мас m_n і m_c – етапи 6..8.

Прямий хід мас m_c і m_n фіксується на координатах y_{1c} і y_{1n} (тут індекс « n » означає «прямий хід»). Рух зворотного ходу y_{2c} і y_{2n} (тут індекс « $з$ » означає «зворотний хід») – починається з кінцевої правої позиції мас m_c і m_n .

Для отримання високої частоти імпульсів тиску, характерної для гідроімпульсних пристроїв, часто доводиться зменшувати об'єм напірної порожнини W_0 . Відповідно, при розробці динамічної та математичної моделей системи, найкращим підходом є використання «пружно-зосередженої моделі» енергоносія, що дозволяє знехтувати масою рідини у порожнині А.

Гідравлічна ланка приводу представлена як в'язко-пружна модель, що складається з безінерційного пружного елемента k_{or} і дисипативного елемента c_{or} . У рамках такого моделювання, гідравлічна ланка приводу пристрою представляється тілом Кельвіна-Фойгта [58,59,60].

У ході робочого циклу ця гідравлічна ланка зазнає деформації з певною швидкістю та взаємодіє з рухомими масами пристрою m_c і m_n пристрою через передаточні відношення:

$$i_{oj} = A_j^2 \cdot A_0^{-2}, \quad (2.1)$$

де A_j – площа поперечного перерізу рухомої ланки пристрою; A_0 – площа поперечного перерізу усередненої напірної гідролінії приводу пристрою.

$$A_o = \sum_{k=1}^n (l_k \cdot A_k) / \sum_{k=1}^n l_k \quad (2.2)$$

тут l_k, A_k – відповідно довжина та площа перерізу k гідроканалу.

Пружний елемент (який не має інерції) має жорсткість відносно площі A_0 , що встановлюється згідно з такою залежністю:

$$k_{or} = A_0^2 \kappa W_0^{-1} \quad (2.3)$$

На підставі досліджень [59,61,62], існує можливість перерахувати дану жорсткість на будь-яку іншу площу поперечного перерізу гідроімпульсного приводу, використовуючи наступне співвідношення:

$$k_{oj} = i_{oj} k_{or}, \quad (2.4)$$

де $j=1,2,...,n$ – порядковий номер ланки елементів приводу.

Відповідно до моделі енергоносія, запропонованої у працях [58], сила в'язкого опору F_{fo} безінерційного дисипативного елемента c_{or} може бути розрахована за такою формулою:

$$F_{fo} = c_o \cdot \dot{x}_{or}, \quad (2.5)$$

де $\dot{x}_{or} = dx_{or} / dt$ – швидкість деформації x_{or} гідравлічної ланки (тіла Кельвіна-Фойгта); $c_o = \pi \mu d_o / 4 \approx 0,785 \mu d_o$ – коефіцієнт в'язкого опору деформування гідравлічної ланки (тут μ – динамічна в'язкість енергоносія; $d_o = 2\sqrt{(A_0 / \pi)}$).

Якщо дисипативний елемент гідравлічної ланки зводиться до відповідних площ рухомих частин гідроімпульсного приводу, то дисипативну силу опору дозволяється застосовувати до цих площ, використовуючи наступну формулу:

$$F_{fj} = i_{oj}^{-0,5} \cdot c_o (\dot{x}_{A_j} \pm \dot{y}_j) \quad (2.6)$$

де $x_{Aj} = x_{or} \cdot i_{oj}^{-0.5}$ – деформація гідравлічної ланки, зведена до площі поперечного перерізу $A_{ji} \cdot \dot{y}_j$ – швидкість руху i -ї ланки приводу.

Тиск p_r енергоносія, що знаходиться в напірній усередненій гідролінії A_0 та деформація гідравлічної ланки x_{or} пов'язані такою простою математичною залежністю [61]:

$$p_r = x_{or} \cdot k_{or} \cdot A_0^{-1} \quad (2.7)$$

Згідно з дослідженням [58], у моделі гідроімпульсних приводів допустимо ігнорувати як тиск енергоносія, так і жорсткість гідравлічної ланки зливної порожнини.

Порівняння залежностей (2.8) і (2.9) дає можливість визначити співвідношення між рівнями тиску «відкриття» та «закриття» ГІТ і відповідними деформаціями гідравлічної ланки:

$$x_{0\max} = p_1 A_0 \cdot k_{or}^{-1}; \quad (2.8)$$

$$x_{0k} = p_2 A_0 \cdot k_{or}^{-1} = x_{0\max} \cdot A_1 \cdot A_2^{-1} = x_{0\max} i_{21}^{0.5} \quad (2.9)$$

де $i_{21} = A_1^2 \cdot A_2^{-2}$ – внутрішнє передаточне відношення в ГІТ між площами робочих перерізів поршня-ударника (рис. 2.11)

Співвідношення передачі від гідравлічної ланки до поршня-ударника (4) (рис. 2.11); сила тертя R (напівсухого або напіврідкого типу) виникає у спряженнях поршня-ударника (4) та його штоків (4.1 і 4.3) з напрямними поверхнями гільзи пристрою (рис. 2.11); коефіцієнти в'язкого тертя c_1 та c_3 – відповідно: c_1 – у спряженнях запірного елемента поршня-ударника (4) з поверхнею центральної осьової розточки гільзи, c_3 – у спряженнях прямої поверхні сидла з осьовою розточкою гільзи; Сила F_y яка є результатом ударної взаємодії наконечника (4.2) з поверхнею деталі (Д). (рис. 2.11).

Сила F_y визначається характером ударного контакту наконечника (4.2) із поверхнею деталі (Д). Крім того, на неї впливають пружні та міцнісні характеристики матеріалів як наконечника (4.2), так і деталі (Д). Щоб отримати науково обґрунтовану залежність для визначення F_y , необхідно врахувати наступне:

1. кінетична енергія яку поршень-ударник (1) набуває наприкінці свого зворотного ходу, трансформується у пружну $\delta_{пд}$ та пластичну $\delta_{плд}$ деформації деталі (Д):

$$E_k = 0,5m_{II} \cdot V_{II\max}^2, \quad (2.10)$$

де $V_{II\max}$ – максимальна швидкість поршня-ударника 1 в кінці його зворотного ходу; m_{II} – маса поршня-ударника [62].

2. оскільки пластична деформація деталі (Д) є суттєво меншою за пружну деформацію $\delta_{ПД} < \delta_{пд}$, кінетична енергія E_k майже повністю переходить у потенціальну енергію пружної деформації деталі (Д). При цьому лише невелика частка енергії витрачається на переміщення поршня-ударника (4) та деформацію його пружної частини у напрямку прямого ходу y_{II} (цей процес обумовлений відскоком):

$$E_k = E_{кд} + E_{кв} = 0,5k_D \cdot \delta_{ПД}^2 + E_k \cdot k_{\epsilon}^2 \quad (2.11)$$

або

$$0,5k_D \cdot \delta_{ПД}^2 = E_k(1 - k_{\epsilon}^2) = 0,5m_{II} \cdot V_{II\max}^2(1 - k_{\epsilon}^2), \quad (2.12)$$

де k_D – місцева (контактна) жорсткість деталі Д, що обробляється; k_{ϵ} – коефіцієнт відновлення для частково пружного удару наконечника (4.2) по деталі Д. Для удару сталлю по сталі коефіцієнт $k_{\epsilon} = 5/9 \approx 0,59$ ($V_{II\max} \leq 3$ м/с);

3. потенціальна енергія переходить у роботу, що створюється силою удару наконечника (4.2) на ділянці деформації $\delta_{ПД}$. Цю роботу можливо визначити за стандартною фізичною формулою (при цьому припускається, що вектори сили F_y та максимальної швидкості $V_{II\max}$ є колінеарними) [62]:

$$F_y \cdot \delta_{ПД} = 0,5m_{II} \cdot V_{II\max}^2(1 - k_{\epsilon}^2), \quad (2.13)$$

звідки

$$F_y = 0,5m_{II} \cdot V_{II\max}^2(1 - k_{\epsilon}^2) \cdot \delta_{ПД}^{-1}. \quad (2.14)$$

Оцінка максимальної швидкості поршня-ударника (4) після завершення його зворотного ходу здійснюється на основі припущення (2).

$$E_k \cdot k_{\epsilon}^2 = 0,5 \cdot V_{II\max}^2 \cdot m_{II} \cdot k_{\epsilon}^2 = 0,5 \cdot k_2 \cdot h_{пв}^2, \quad (2.15)$$

звідки

$$V_{\Pi \max} = \frac{h_{n\delta}}{k_{\delta}} \cdot \sqrt{\frac{k_2}{m_{\Pi\Sigma}}} = h_{n\delta} \cdot \omega_{02} \cdot k_{\delta}^{-1}, \quad (2.16)$$

де $h_{n\delta}$ – хід відскоку поршня-ударника (1) після його взаємодії з деталлю D ;
 ω_{02} – власна частота коливань маси m_{Π} .

Підставивши (2.9) в (2.7), знайдемо:

$$F_y = 0,5 \cdot \omega_{02}^2 (k_{\delta}^{-2} - 1) h_{n\delta}^2 \cdot \delta_{n\delta}^{-1}, \quad (2.17)$$

або із врахуванням $k_{\delta} = 0.56$

$$F_y = 1,094 \cdot m_{\Pi} \cdot \omega_{02}^2 \cdot h_{n\delta}^2 \cdot \delta_{n\delta}^{-1}. \quad (2.18)$$

Сила F_y що є результатом удару, збалансовується пружною реактивною силою, яка генерується внаслідок деформації деталі (D):

$$F_y = k_D \cdot \delta_{n\delta} \quad (2.19)$$

Відому залежність [62] можливо вивести шляхом алгебраїчного спрощення формул (2.11) і (2.12). При моделюванні контакту наконечника (4.2) та деталі (D) прийняти його аналогічним контакту двох сфер (як, наприклад, при обробці циліндричної деталі (D) сферичним наконечником (4.2)), то теорія контактних деформацій передбачає утворення зони деформації. Якщо ця зона є сферичним сегментом, радіус основи якого обчислюється за формулою:

$$r = 0,883 \sqrt{F_y \frac{E_y^{-1} + E_D^{-1}}{R_y^{-1} + R_D^{-1}}}, \quad (2.20)$$

де E_y , E_D – модулі пружності матеріалів наконечника (4.2) та деталі D ; R_y , R_D – радіуси ударної частини наконечника (4.2) та деталі.

Припустимо, що пружна деформація охоплює певний об'єм деталі (D) та наконечника (4.2). Беручи до уваги, що наконечник зазвичай виготовляється зі сталі ШХ-15, яка має набагато вищу твердість, ніж матеріал деталі (D), пружною деформацією наконечника можна нехтувати. Отже, приймається, що деформується виключно деталь (D).

Приймаємо, що об'єм пружної деформації є сферичним сегментом із радіусом основи r та висотою $\delta_{пд}$. Площа основи цього сферичного сегмента визначається за залежністю, відомою з елементарної математики:

$$A_{\text{дс}} = \pi \cdot (\delta_{пд}^2 + 2r^2), \quad (2.21)$$

площу бокової поверхні

$$A_{\text{дз}} = \pi \cdot (r^2 + \delta_{\text{пд}}^2) \quad (2.22)$$

та об'єм

$$W_{\text{д}} = \pi \delta_{\text{пд}}^2 (3r^2 + \delta_{\text{пд}}^2) / 6. \quad (2.23)$$

Контактну жорсткість $k_{\text{д}}$ визначимо, використовуючи площу $A_{\text{д}\delta}$, як характерну величину, за формулою аналогічною $k_{\text{ор}}$:

$$k_{\text{д}} = A_{\text{д}\delta}^2 \cdot E_{\text{д}} / W_{\text{д}} = 6\pi(r^2 + \delta_{\text{пд}}^2)^2 E_{\text{д}} / [(3r^2 + \delta_{\text{пд}}^2)\delta_{\text{пд}}^2]. \quad (2.24)$$

Якщо наконечник 4.2 та деталь (Д) (рис. 2.16) виготовлені з однакових матеріалів, то $E_{\text{у}} = E_{\text{д}}$:

$$r = 0.88\sqrt[3]{2F_{\text{у}} \cdot R_{\text{у}} \cdot R_{\text{д}} / [E_{\text{д}}(R_{\text{у}} + R_{\text{д}})]} = B \cdot F_{\text{у}}^{1/3}. \quad (2.25)$$

де

$$B = 0.88\sqrt[3]{2R_{\text{у}} \cdot R_{\text{д}} / [E_{\text{д}}(R_{\text{у}} + R_{\text{д}})]} = \text{const} \quad (2.26)$$

Це положення використовується для заданої деталі та пристрою, що виконує деформаційне зміцнення.

Шляхом підстановки формули (2.25) у співвідношення (2.24) та (2.19), ми знайдемо рівняння, яке визначає закон зміни сили $F_{\text{у}}$. Це рівняння базується на теорії контактних пружних деформацій деталі (Д) під час її обробки за допомогою цього пристрою:

$$3B^2 \cdot F_{\text{у}}^{5/3} - 6\pi E_{\text{д}} \cdot B^2 \cdot F_{\text{у}}^{2/3} + \delta_{\text{пд}}^2 F_{\text{у}} - 6\pi \delta_{\text{пд}}^2 E_{\text{д}} = 0. \quad (2.27)$$

Рівняння (2.27), що має ірраціональний вигляд, описує взаємозв'язок між силою $F_{\text{у}}$, пружною деформацією деталі (Д), геометричними характеристиками деталі (Д) і наконечника (4.2) та пружними параметрами їхніх матеріалів.

Оскільки рівняння (2.27) є надто складним для отримання точного аналітичного рішення, його розв'язання зазвичай проводиться числовими методами [58,59,62].

2.6. Висновки до 2 розділу

Комплексно досліджено ключові вимоги та розроблено конструктивні рішення, необхідні для підвищення ефективності та швидкодії гідроімпульсного приводу у складі вібраційних, віброударних машин, а також пристроїв для поверхнево-пластичної деформації.

Головним технічним завданням визначено забезпечення максимальної гідравлічної жорсткості системи, що здійснюється шляхом мінімізації сумарного об'єму напірної порожнини. Це зrealізовано через проєктування максимально коротких гідравлічних каналів та інтеграцію комунікацій у розподільну плиту, що сприяє компактності конструкції та зниженню енергетичних втрат.

Уперше було розроблено принципову схему пресу з електрогідравлічним керуванням для формоутворення деталі. Для забезпечення необхідної частоти удару було визначено циклограму зміни тиску в гідроаккумуляторі та в порожнині виконавчого гідроциліндру. Завдяки використанню програми ISIS вперше була розроблена і впроваджена електрична схема блоку керування, що забезпечує використання частоти удару від 25, 50 Гц.

Доведено, що мінімальний тиск запуску ударника становить в межах 12,5 МПа, забезпечується амплітудою коливань до 2 мм.

На мікротвердість і форму кристалічної ґратки в процесі експериментального дослідження впливали різні площини контакту робочих поверхонь ударника. Найприйнятніша форма ударника – сферична (куля) із радіусом заокруглення 10 мм. При ударній дії визначено характер поширення наклепаної зони під поверхню відбитка.

Робочий діапазон гідроімпульсного пристрою становить 5,6 МПа амплітуда 2 мм частота 25, 50 Гц.

Результати розділу забезпечують науково-технічну базу для проєктування оптимальної конструкції гідроімпульсного приводу підвищеної швидкодії. Визначені вимоги та математичні моделі є основою для подальших розрахунків та експериментального підтвердження параметрів ГП, спрямованих на максимізацію його ефективності у процесах деформаційного зміцнення.

частинок у ґрунті, зокрема кварцового піску. Експериментальні дані показують, що ступінь зношування істотно різниться залежно від складу ґрунту. Швидкість зношування суттєво зростає при переході від глинистих ґрунтів до легших: приймаючи інтенсивність зношування на глинистих ґрунтах за одиницю, на піщаних вона зростає в 1,5 рази, на суглинкових – майже в 1,9 рази, а на супіщаних – у 2,3 рази.

Зміна вологості (W) глинистих та суглинкових ґрунтів у діапазоні від сухого стану до 60-80% насичення водою спочатку викликає збільшення коефіцієнта тертя (f) їхньої поверхні об поліровану сталь. Після досягнення свого пікового значення, коефіцієнт поступово спадає (рис. 3.2, криві 3 і 4). Крім того, чим більше глинистих часток містить ґрунт (тобто, чим щільніша його структура), тим вищим є максимальний коефіцієнт тертя, зафіксований у вологому стані при контакті зі [30,31].

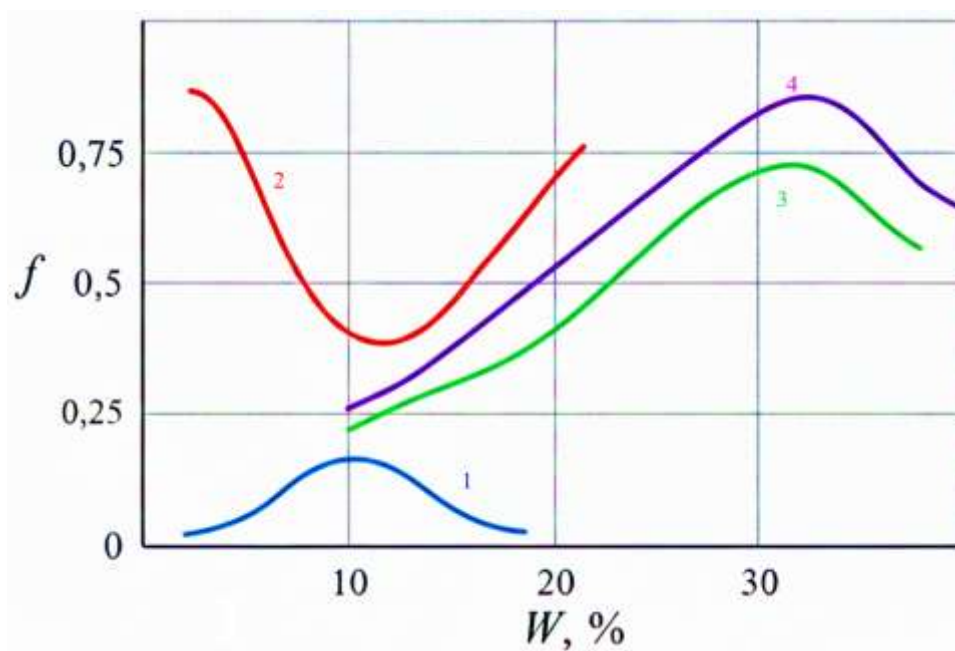


Рисунок 3.2 – Коефіцієнт тертя ґрунту об сталь змінюється залежно від його вологості: 1 – піщані ґрунту; 2 – супіщані ґрунти; 3 – середні суглинки; 4 – важкі суглинки і глини

Джерело: [30]

Під час відновлення геометричних параметрів робочих органів ґрунтообробної сільськогосподарської техніки у поверхневому шарі деталі

завжди фіксується певний ступінь пластичної деформації. Це явище викликає деформаційне зміцнення (наклеп), інтенсивність якого залежить від різноманітних факторів зокрема від параметрів обробки, використаного інструменту, його стану і інших умов обробки [63,64].

Полікристалічні матеріали (метали, сплави) характеризуються тим, що при деформації форма та орієнтація зерен зазнають змін. Наслідком цього є формування волокнистої текстури, де кристали переважно орієнтовані в одному напрямку. Зерна починають обертатися, приймаючи орієнтацію, що забезпечує максимальну міцність під дією деформації. В ході цього процесу зерна стискаються і витягуються в напрямку пластичного плину металу (рис. 3.3).

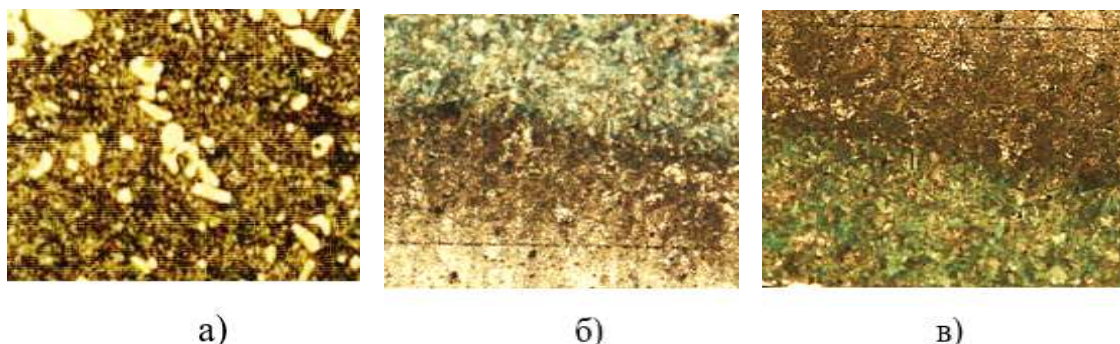


Рисунок 3.3. – Схема зміни мікроструктури полікристалічного металу (сталь 65Г) при деформації: а – вихідний стан, $\varepsilon=0\%$; б – $\varepsilon=50\%$; в – $\varepsilon=90\%$

Джерело: сформовано автором

Коли зерна орієнтуються вздовж напрямку деформації, це явище називається текстурою деформації металу. Формування цієї текстури призводить до анізотропії властивостей матеріалу (різниці у властивостях, виміряних паралельно і перпендикулярно волокнам). Варто зазначити, що деякі характеристики металів залишаються незмінними незалежно від рівня деформації (є структурно нечутливими). Серед них: періоди кристалічної ґратки, валентність, модуль пружності, теплоємність, температура плавлення та інтенсивність намагнічування. Отже, пластична деформація справляє глибокий вплив на внутрішню структуру та характеристики металу.

Пластична обробка деталей при знижених температурах вимагає прикладання великих зовнішніх навантажень. Цей метод найчастіше використовується для ремонту (відновлення) компонентів із кольорових металів, їхніх сплавів, а також сталевих деталей (з вмістом вуглецю $\leq 0,3\%$), які не зазнавали термічної обробки [62,63,65].

Коли деталі нагрівають до температури, що наближається до точки плавлення (приблизно $\theta = 0,8 - 0,9$ від температури плавлення), зусилля, потрібні для пластичної деформації, значно скорочуються, зазвичай у 12-15 разів. При цьому фізико-механічні характеристики металу залишаються майже незмінними. Після пластичного деформування деталі можуть потребувати подальшої термічної або механічної обробки.

Методи відновлення компонентів у холодному стані застосовуються для низьковуглецевих сталей і кольорових металів. У такому випадку структура матеріалу залишається незмінною, але відбувається збільшення твердості та зниження в'язкості (явище деформаційного зміцнення).

Процес відновлення деталей із середньовуглецевої, високовуглецевої та легованої сталі здійснюється у гарячому стані, коли їхня температура становить $\theta = 0,7 - 0,9$ від температури плавлення. При такому нагріванні необхідні зусилля значно знижуються, хоча це призводить до модифікації структури та механічних властивостей матеріалу.

Суть методу полягає у відновленні геометрії поверхонь завдяки контрольованому перерозподілу металу всередині деталі. Для здійснення цього переміщення застосовуються спеціальні інструменти – матриці, пуансони та оправки, а зусилля, що використовуються, перевищують межу текучості матеріалу.

Одним із поширених прийомів для формування потрібного профілю виробів із твердих матеріалів є процес видавлювання за допомогою пуансона.

Ця технологія відновлення (з використанням пластичної деформації) може бути застосована лише до деталей, виготовлених із пластичних матеріалів, таких як сталь 20, 50, 65Г або сплав Л-53 [65,66,67].



Рисунок 3.4 – Культиваторна лапа з огранкою

Джерело: сформовано автором

Технологія ППД використовується в усіх промислових галузях. Пружно-пластична деформація і локальний тепловий вплив, що відбуваються під час цієї обробки, визначають напружено-деформований та фізичний стан поверхневого шару. В результаті застосування методів ППД, поверхня набуває вищої твердості, позитивного розподілу залишкових напружень стиснення та згладженої мікроструктури [4-6].



Рисунок 3.5 – Товщина лапи і кут заточування робочої поверхні: $h = 5-7$ мм висота, $\gamma = 25-35^\circ$ кут

Джерело: сформовано автором

Завдяки поєднанню ППД та локального теплового впливу, на поверхні деталі створюється особливий напружено-деформований і фізичний стан. Така обробка змінює мікрорельєф поверхні, покращуючи фізико-механічні характеристики шару за рахунок підвищення твердості, формування залишкових напружень стиснення та усунення мікронерівностей. У результаті значно

поліпшуються такі параметри, як втомна міцність, зносостійкість і корозійна стійкість деталей [67].

Зміцнений шар має структуру, подібну до азотованої. Він розділений на дві зони: зовнішній шар (який не травиться) та внутрішній (дифузний) підшар, що характеризується поступовим переходом до структури основного матеріалу.

Слід зазначити неоднорідний фазовий склад зміцненого шару, який включає мартенсит, аустеніт, а також дрібнодисперсні включення нітридів, карбідів і карбонітридів. Загальна глибина цього багат шарового покриття, що досягається за допомогою типового обладнання, становить приблизно 0,02-0,25 мм.

3.2. Дослідження закономірностей робочих режимів гідроімпульсного приводу

Для відновлення початкових спряжених розмірів і форм деталей, крім звичайної ковальської обробки і штампування в гарячому стані металів, при ремонті застосовують холодне і з місцевим підігрівом пластичне деформування [64,68,69,70]. До таких поширених типових операцій належать: осадка, роздача і випрямлення. Цим способом ремонтують різальні кромки робочих органів ґрунтообробної техніки, застосовують для цього гідравлічний прес.

Під час проведення експериментальних досліджень варіювались такі параметри:

- подача гідронасоса ($\text{м}^3/\text{с}$): $0-1,1 \cdot 10^{-3}$;
- зміна частоти вхідного сигналу на електрогідравлічний клапан, що відповідав режиму його роботи (Гц): $0-50$, з кроком у $2,5$ Гц;



Рисунок 3.6 – Світлини експериментального стенда гідроімпульсного приводу

Джерело: сформовано автором

Конструктивні та технічні параметри дослідного зразка пресу з електрогідравлічним керуванням наведені в таблиці 3.2.

Експериментальний стенд пресу з електрогідравлічним керування для формоутворення заготовок (рис.3.6) складається з персонального комп'ютера (ПК), до якого приєднано через аналоговоцифровий перетворювач (АЦП Е14-140) блок керування (БК).

До АЦП підключений датчик переміщення (TURK Ni8-M18-LiU) та датчик тиску (ADZ-SML-10). БК з'єднаний електромагнітом електрогідравлічного клапана-пульсатора (УЕГ.С-200).

Конструктивні та технічні параметри дослідного зразка пресу з електрогідравлічним керуванням

Найменування параметра та його позначення	Одиниця вимірювання	Числове значення параметра
Площі поперечного перерізу: — плунжера вертикального гідроциліндра — золотника електрогідравлічного клапана	м^2 м^2	$7,85 \cdot 10^{-3}$ $8,6 \cdot 10^{-5}$
Умовний прохід (d_y)	м	$18 \cdot 10^{-2}$
Середнє значення площі поперечного перерізу напірної гідролінії (f_0)	м^2	$4,91 \cdot 10^{-4}$
Об'єм напірної порожнини гідросистеми приводу (W_0)	м^3	$9,05 \cdot 10^{-4}$
Максимальний об'єм циклового гідроаккумулятора типу «місткість»	м^3	$5,04 \cdot 10^{-4}$
Основні характеристики регулятора витрат: — номінальний робочий тиск; — межі регулювання витрат; — умовний прохід.	МПа $\text{м}^3/\text{с}$ м	10 $(0,3 \dots 2,4) \cdot 10^{-3}$ $2,5 \cdot 10^{-2}$
Подача насосів приводів: (Q_H) — гідроімпульсного вертикального циліндра; — рухомої траверси.	$\text{м}^3/\text{с}$ $\text{м}^3/\text{с}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$ $0,32 \cdot 10^{-3}$
Потужності електродвигунів насосів: — гідроімпульсного вертикального циліндра; — рухомої траверси.	кВт кВт	18,5 3,3
Максимальне зусилля, що розвивається приводами: — приводу вертикального гідроциліндра; — приводом рухомої траверси.	Н Н	$23 \cdot 10^4$ $5 \cdot 10^4$
Максимальне робочий тиск у гідросистемах: — приводу вертикального гідроциліндра; — приводом рухомої траверси.	МПа МПа	14 6,3
Маси ланок пристрою: — виконавчої ланки зведеної до плунжера гідродвигуна при установці на вібростіл максимальної заготовки; — рухомої траверси; — золотника електрогідравлічного клапана;	кг кг кг	300 80 $1,01 \cdot 10^{-2}$
Жорсткості пружних елементів: — повернення виконавчої ланки ІВІМ (k_3); — пружини гідроаккумулятора (k_2);	Н/м Н/м	$2,37 \cdot 10^6$ $1,13 \cdot 10^6$
Жорсткість гідравлічної ланки приводу, зведеної до усередненої площі	Н/м	$2,43 \cdot 10^5$

Джерело: сформовано автором

3.3. Поверхнева пластична деформація при гідроімпульсному впливі

Конструктивне рішення обладнання для пресування є схожим щодо розташування виконавчих механізмів. Основна відмінність полягає у типі приводу, який генерує необхідні коливання. Тому номенклатуру можна представити таким чином:

Прес із гідравлічним приводом створюється на базі типового одно- чи двостійкового пресу. Привід робочої ланки може бути розташований зверху або знизу, і він прикладає циклічне навантаження до заготовки з одного боку.

Використання різноманітних гідравлічних віброзбуджувачів для приводу робочих ланок стало причиною широкого розмаїття розроблених гідравлічних пресів. Ці преси були створені низкою проєктних і науково-дослідних установ.

Пропонується класифікувати всі типи гідравлічних віброзбуджувачів, що використовувалися (або були випробувані) для приводу вібраційних пресів на базі стандартних гідравлічних пресів, на пульсаторні та автоколивальні [67,73,75].

Пульсаторні столи працюють на основі створення циклічного тиску в робочому гідроциліндрі. Їх можна поділити на насосні (які забезпечують замкнуту циркуляцію гідравлічної рідини) та золотникові (де розподільний елемент примусово зміщується або обертається окремим приводним механізмом).

Застосування автоколивальних гідравлічних віброзбуджувачів (як із механічним, так і з гідравлічним зворотним зв'язком) дещо розширило можливості регулювання параметрів навантаження пресу. Незважаючи на такі недоліки, як залежність параметрів вібрації від навантаження, шум та ударний характер роботи, автоколивальні гідравлічні стенди активно використовуються у конструкціях гідравлічних пресів.

Використання автоколивальних гідравлічних віброзбуджувачів (з механічним або гідравлічним зворотним зв'язком) розширює діапазон регулювання параметрів навантаження пресу. Хоча параметри вібрації залежать

від навантаження, а робота супроводжується шумом та ударами, автоколивальні гідравлічні системи набули широкого поширення в реальних конструкціях пресів.

Найбільш відповідними для гідравлічних пресів за критеріями технологічності, надійності та можливості забезпечення заданих параметрів навантаження є автоколивальні віброзбуджувачі із зазорами у механічному зворотному зв'язку (між розподільником і сервоклапаном) та ті, що мають гідравлічний зворотний зв'язок після падіння тиску. У технічній літературі ці пристрої помилково називають «пульсаторами» і «пульсаторними клапанами». Наприклад, «пульсатор» був назвою для пресів типу ППН, а «клапан пульсатора» — для прототипу гідроінерційного пресу [23,59].

Було використано пресове обладнання моделей ППН-100 (привід згори, 100 кН) та ППН-315 (привід знизу, 315 кН) для виконання калібрування профілів з легких сплавів.

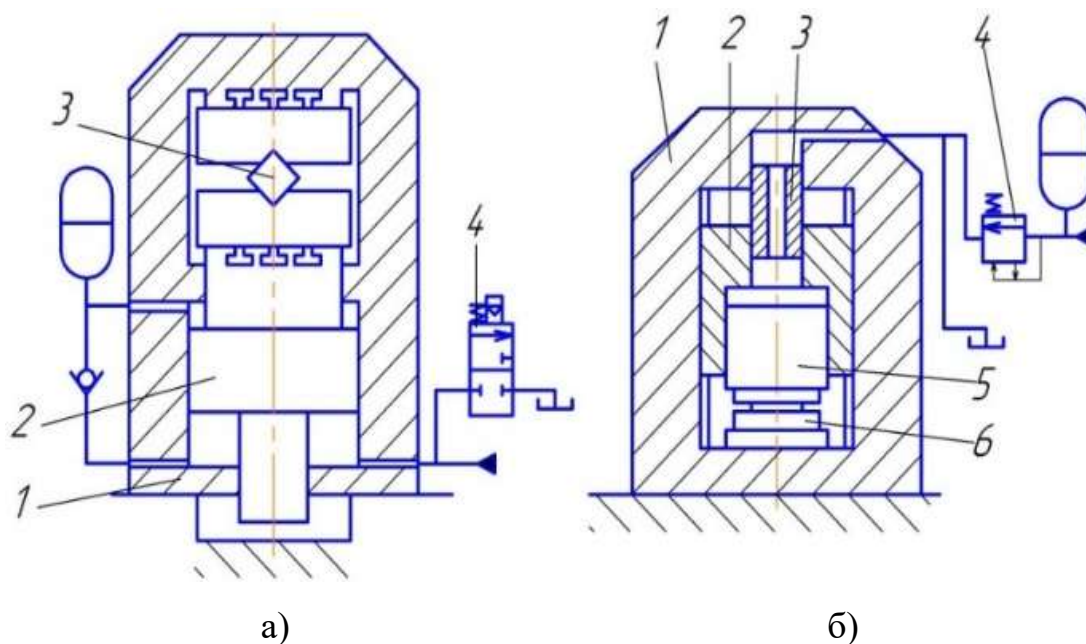


Рисунок 3.7 – Матриця пресів: а – пульсаційного навантаження (ППН):

1 – станина; 2 – привід; 3 – роз'ємна матриця; 4 – пульсатор;

б – гідравлічний інерційний прес (ГП): 1 – станина; 2 – інерційна маса;

3 – розширювальний трубопровід; 4 – клапан-пульсатор; 5 – плунжер;

6 – заготовка

Джерело: [73]

Гідроінерційний прес являє собою фундаментально нове конструктивне рішення у сфері пресового обладнання. Він принципово відрізняється від звичайних гідравлічних пресів методом генерації сили, що прикладається до заготовки.

Таблиця 3.2

Основні ударні технологічні процеси

Технологічний процес	Технологічна операція	Метод обробки	Галузь виробництва
Отримання заготовок виробів з непластичних порошкових матеріалів	Ущільнення, формоутворення, пресування	ВУ	Металургія, машинобудування, автомобілебудування, електротехнічна промисловість
Отримання виробів з пластичних матеріалів при обробці тиском	Пульсаційна витяжка, осадка, штампування, калібрування, волочіння, прокатування	В	Машинобудування
Кінцева обробка деталей абразивними матеріалами	Шліфування, полірування, зміцнення, доопрацювання	В	Машинобудування
Виготовлення ливарних форм	Формоутворення, ущільнення	ВУ	Металургія, ливарна промисловість
Випробовування деталей вузлів машини	Ресурсні, форсування та інші типові випробування	В, ВУ	Приладобудування, радіотехніка, авіа-, тракторо- та машинобудування
Будівельно – монтажні роботи	Забивання спаїв, ущільнення ґрунтів, цементу і т.п.	ВУ	Будівництво

Джерело: [73]

На рисунку 3.7, б представлено гідравлічний інерційний прес, де плунжер (5) приводить у дію заготовку (6) за допомогою періодичних імпульсів тиску рідини. Ця рідина подається через клапан-пульсатор (4) та розширювальний трубопровід (3) у порожнину робочого гідроциліндра. Корпус гідроциліндра виступає в ролі інерційної маси (2), яка рухається відносно станини (1).

Заготовка приводиться в рух завдяки імпульсам тиску [75,76].

Підвищення втомної міцності таких механічних компонентів, як вали і шестерні, найбільш ефективно досягається за допомогою деформаційного зміцнення матеріалів, з яких вони виготовлені.

ППД обробка сприяє підвищенню ефективності технологічного процесу, а в окремих випадках покращує точність і якість поверхні. Водночас, обробка без вібрації матеріалів із високою в'язкістю та тугоплавкістю (наприклад, титанових сплавів та нержавіючої сталі) генерує стружку, яка не тільки створює виробничі труднощі, але й є джерелом значного ризику травматизму для персоналу.

Дослідження в режимі ударного навантаження показали: якщо перший імпульс викликав лише пружні зміни, то наступні імпульси сили призводять до прогресуючої пластичної деформації заготовки. Це типово для ударного пресування заготовок з малою кількістю наповнювача в умовах стаціонарного інерційного навантаження.

Під час початкового циклу навантаження було зафіксовано відставання імпульсу сили, переданого пуансоном на заготовку, від моменту реєстрації початку зростання зусилля на дні прес-форми. Це вказує на залежність швидкості передачі навантажувального імпульсу в матеріалі заготовки від її фізичних і механічних властивостей. Ця особливість поширення силового імпульсу через заготовку пояснюється її хвилювими характеристиками. (рис. 3.8) [77,78,79].



Рисунок 3.8 – Процес деформації металу (алюміній Al6) під оглядом елементарних ділянок

Джерело: сформовано автором

Необхідно підкреслити рівномірність пресування під час використання ударних пресів у порівнянні зі стандартними моделями. У звичайних пресах розподіл структури шару є нерівномірним внаслідок внутрішнього та бокового тертя.

Труднощі з переміщенням структури матеріалу по внутрішній поверхні форми добре ілюструє факт, що шар фольги або кальки, який відокремлює частину початкового об'єму, орієнтується перпендикулярно до осі прикладеного навантаження [73,78,81].

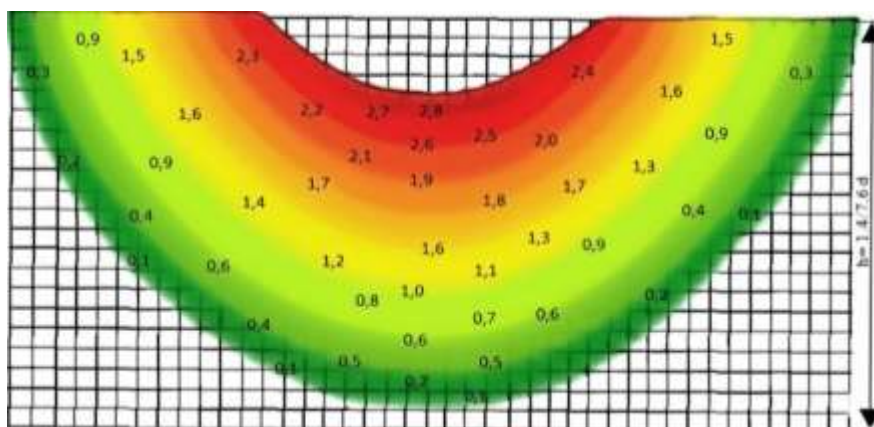


Рисунок 3.9 – Зона поширення пластичної деформації за викривленням прямокутної сітки для сталі 65Г

Джерело: сформовано автором

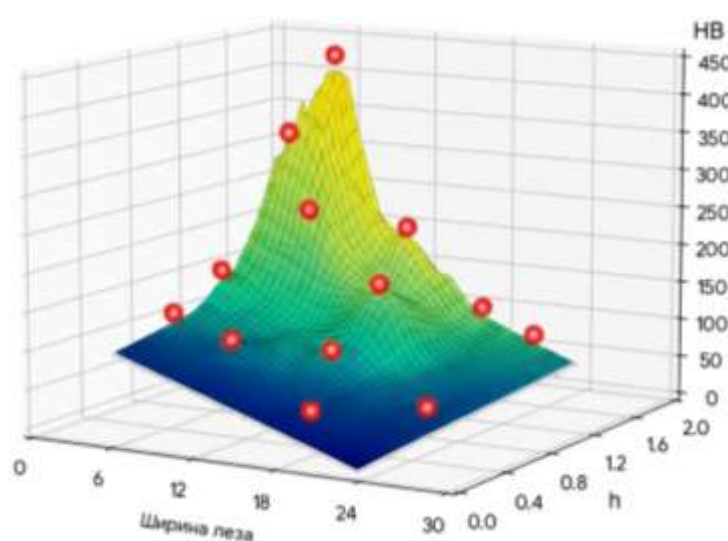


Рисунок 3.10 – Залежність критеріїв оптимізації від коефіцієнта пластичності та поверхні відбитку для сталі 65Г

Джерело: сформовано автором

При ударному навантаженні на матеріал відбувається пластичне деформування, що може призводити до зміни геометричних параметрів, твердості пришарової ділянки, що відображається зміною коефіцієнта пластичності, яке призводить до зміни твердості оброблюваного матеріалу. При реалізації процесу деформаційного зміцнення виявилось, що коефіцієнт пластичної деформації на поверхні дії ударника максимальний та становить $\delta_{\max}=2,7$, а при заглибленні (деформації) мінімальне значення коефіцієнта пластичності – $\delta_{\min}=0,1$ (рис. 3.9, 3.10). Максимальна глибина деформації поверхневого шару сталі 65Г становила $h=1,5$ мм.

Зі збільшенням навантаження шари згинаються вздовж осі пресу. Якщо об'ємні пропорції спочатку однакові, верхній шар буде тоншим, тобто щільнішим, ніж нижній. Це наочно демонструє той факт, що тиск пресування зменшується в міру віддалення від пуансона [81,82,83].

Інерційний прес (ІП) (рис. 3.11) включає привід нижнього столу (2) з пружним зворотним елементом (3) і рухому поперечину (6) з нерухомою змінною інерційною масою (5), яка вільно переміщується верхньою і нижньою поперечинами станини (1) і напрамної колонки, що утворюють жорстку раму. Приводом ІПМ є вібробудник (клапан-пульсатор) (7) зі зворотним зв'язком за тиском та однотактний гідроакумулятор (8).

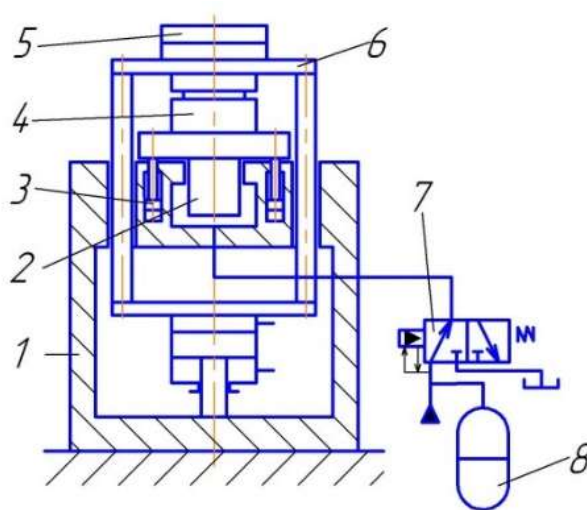


Рисунок 3.11 – Інерційний прес (ІП): 1 – станина; 2. – нижній стіл; 3. – пружний зворотний елемент; 4. – корпус; 5. – нерухома змінна інерційна

**маса; 6. – рухома поперечина; 7. – вібробудник; 8. – одноконтактний
гідроаккумулятор**

Джерело: [84]

Цей тип гідроімпульсного приводу створює прямий зв'язок між енергією гідроаккумулятора та тиском у гідравлічній системі протягом одного робочого циклу. Завдяки цьому можна регулювати параметри ІПМ, використовуючи імпульсну енергію. Інерційне навантаження ІПМ також дає можливість застосовувати додаткове статичне затискання і ефективно працювати у поєднанні з режимами деформації та навантаження, коли заготовка (4) контактує з рухомою поперечиною.

Прес-установки з гідроімпульсним приводом, створені на основі наявних електрогідравлічних агрегатів (ЕГА), зокрема «Удар», також заслуговують на увагу. Проте, використання пресів із електрогідравлічним приводом на даний час не є раціональним через функціональні обмеження останнього. Так, у пресах «Удар» електрична частина становить 80% об'єму, але гарантує розрахункову енергопередачу гідравлічних імпульсів із максимальною частотою два-три імпульси на хвилину. Якщо виникає потреба підвищити частоту імпульсів на ЕГА, енергія одного імпульсу без корекції параметрів різко падає, що унеможливорює виконання технічних завдань, особливо при пресуванні великогабаритних виробів складної конфігурації. [73,74,84,86].

У виробничих умовах для вібраційного пресування заготовок використовувалися переважно преси двох типів: з механічним (П) та гідравлічним (ІПМ) приводом.

Порівняльний аналіз показує, що ІПМ виграє завдяки гнучкості регулювання параметрів навантаження, що дозволяє йому охоплювати ширший спектр виробничих потреб. Враховуючи загальні переваги гідравлічних приводів, ІПМ розглядається як більш перспективне обладнання. Це особливо важливо для збільшення робочих сил і продуктивності, зниження маси

конструкції, а також для підвищення надійності механічних елементів приводу та автоматизації технологічних процесів [88,89,90].

Обираючи обладнання для ущільнення матеріалів, ми віддаємо перевагу пресу типу ІІІ (інерційний прес) як найбільш перспективній машині за техніко-економічними показниками. Це рішення обумовлене стрімким прогресом у сучасних програмних та апаратних засобах комп'ютерних систем, який стався за останні десятиліття у напрямку автоматизації виробництва. Такий прогрес дозволяє відтворювати необхідні технічні параметри на наявному обладнанні шляхом підключення виконавчих механізмів до сучасної системи управління.

Ця автоматизація дає змогу замінити великі та складні комп'ютери, що раніше розміщувалися біля обладнання, на компактні системи управління. Ці системи містять контролер, адаптивну частину, елементи введення та візуалізації інформації. Сучасне програмне забезпечення дозволяє працювати у сфері формування виробів без спеціальної комп'ютерної підготовки та залучення фахівців широкого профілю, а також встановлювати різні датчики для постійного моніторингу технічних характеристик обладнання.

Проте, незважаючи на всі переваги впровадження комп'ютерних технологій у систему управління сучасного виробництва, принцип відтворення основних рухів виконавчого механізму залишається незмінним у його роботі. Отже, основні елементи для збудження вібрації і пресування зберігають ідентичне конструктивне рішення [89,89,90,91].

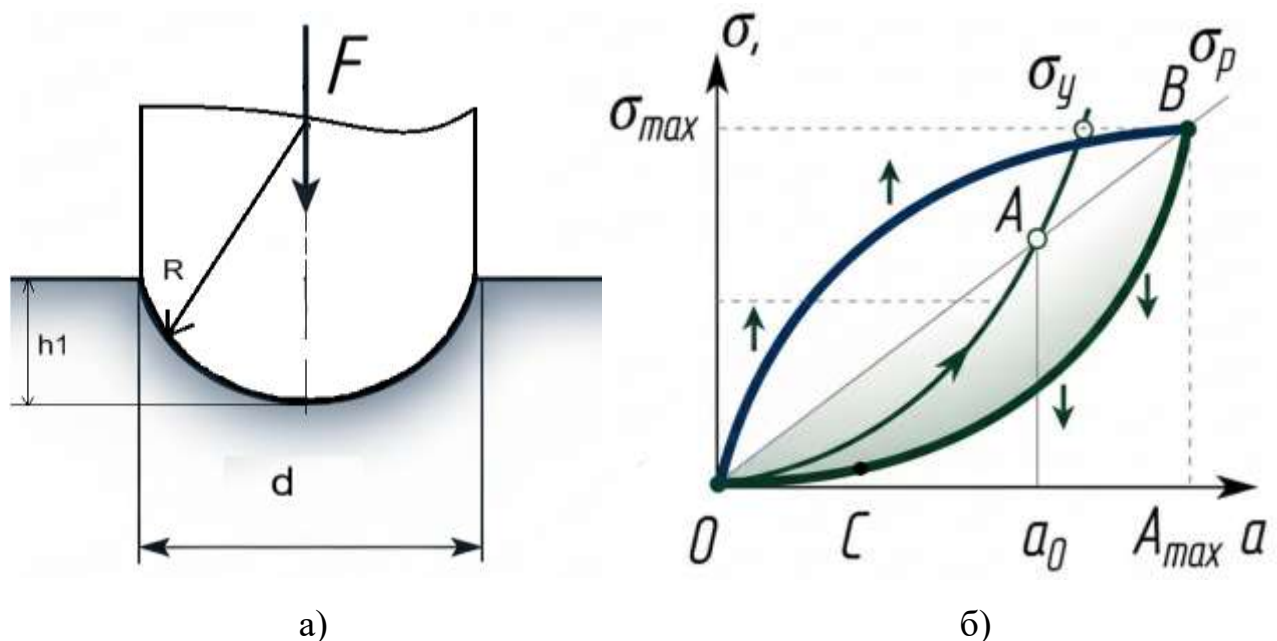
3.4. Визначення поверхневого пластичного деформування в поверхневому шарі під час обробки деталі

Формування поверхневого шару під час обробки деталей методом ППД (поверхневого пластичного деформування) є результатом комплексу взаємопов'язаних явищ, які відбуваються в осередку деформації та прилеглих до нього зонах. До цих явищ належать: багатоциклові пружні та пластичні деформації, зміна міцності та пластичності металу, що деформується, процеси

тертя та теплові ефекти, а також модифікація мікро- та макроструктури і мікрогеометрії самої поверхні та інші фактори [90,91,92].

При проведенні експериментальних досліджень відновлення леза лапи культиватора, в процесі холодного пластичного деформування враховувався показник зміцнення металу і зміна його фізичних властивостей, наклепаного поверхневого шару від величини ступеня деформації. Спостерігається, що із збільшенням ступеня деформації межа текучості збільшується швидше часового опору матеріалу шляхом наклепу і тимчасовий опір можна підвищити в 1,5 – 3 рази, а межу текучості в 3 – 7 рази. Із за неоднорідності деформації в об'ємі металу відмінні зміни щільності, що можуть призводити появи залишкових напружень, як розтягуючих і стискаючих.

Головними показниками ППД є: пружна та пластична деформації у зоні впливу, площа контакту між інструментом і деталлю, величина сили, що діє на інструмент, та напруга, що є наслідком дії цієї сили.



**Рисунок 3.12 – Деформація металу при втискуванні сферичного індентора:
а – відбиток; б – залежність пружної і пластичної деформацій від напруги
вдавлення σ**

Джерело: сформовано автором

Вплив на оброблювану поверхню, незалежно від того, чи є він статичним чи ударним, спершу призводить до утворення інструментального відбитка. Надалі цей відбиток трансформується або в прилеглі сліди, або в послідовність відбитків.

Прикладання статичної чи ударної сили F до твердої кулі (рис. 3.12, а) змушує її занурюватися в матеріал. Зі збільшенням сили F спочатку виникає пружна деформація поверхні, а потім пластична (залежність ОАВ, рис. 3.12, б).

Зворотний хід (зняття навантаження) після виникнення пластичних деформацій відбувається вздовж лінії ВС. Залишкова пластична деформація кількісно виражається розміром відбитка d , що відповідає ОС. Пластичні зміни під відбитком поширюються однорідно і, з невеликими спотвореннями, відтворюють форму кулі.

Глибина зміцненого шару h знаходиться у прямій залежності від глибини відбитка h_1 згідно зі співвідношенням $h = mh_1$. Величина коефіцієнта m залежить від умов обробки і $m = 2 \dots 20$.

Співвідношення між діаметром відбитка d та навантаженням F , прикладеним до кулі при її проникненні в пружну та пластичну зони, описується за допомогою рівнянь, сформульованих Герцем і Мейєром. [92]:

$$F = \frac{1}{3D \left(\frac{1-\mu^2}{E} + \frac{1-\mu_1^2}{E_1} \right)} d^3 \quad (3.1)$$

$$F = a \cdot d^n \quad (3.2)$$

де D – діаметр кулі; E, E_1 – модулі пружності кулі і оброблюваного матеріалу; $\mu; \mu_1$ – коефіцієнти Пуассона кулі і матеріалу; $a, n = 2$ – константи пластичності.

Наведені формули є дійсними для умов, що не враховують тертя, коли контактні матеріали ізотропні та підпорядковуються закону Гука. При цьому площа контакту повинна бути невеликою, а навантаження прикладене перпендикулярно до поверхні. Оскільки процеси ППД (поверхневого пластичного деформування) відбуваються за більш складних умов, ці формули в

такому вигляді мають обмежене використання. Проте вони відображають ключові силові взаємозв'язки, характерні для ППД.

Ступінь пластичної деформації

$$\varepsilon = d / D \quad (3.3)$$

де d – діаметр відбитку (лунки); D – діаметр вдавлюваної сфери.

Для різних методів ППД і різних умов обробки $\varepsilon = 0,1 \dots 0,9$; а для конструкційних сталей $\varepsilon = 0,3 \dots 0,7$.

Здатність структурних складових до зміцнення є неоднаковою. Виявлено, що структура мартенситу забезпечує найбільшу глибину наклепу при заданих умовах, тоді як серед розглянутих структур найменшу глибину зміцненої зони мають сорбітні структури. [93,94].

Ступінь наклепу різних структур проводилася на основі відносного приросту твердості $\frac{\Delta HV}{HV} \cdot 100$ при однакових умовах. Сорбіт характеризується найменшою глибиною зміцненого шару, а також мінімальною мірою наклепу.

Глибина наклепу h знаходиться у зв'язку із силою деформації F через наступну залежність::

$$h = \sqrt{P / (2\sigma_T)}, \quad (3.4)$$

де σ_T – межа текучості матеріалу. Для конструкційних сталей з похибкою не більш ніж $\pm 10\%$ справедливе співвідношення від:

$$\sigma_T = HB / 3, \quad (3.5)$$

тому

$$h = \sqrt{3P / HB}, \quad h = 1.5d \quad (3.6)$$

При статичному навантаженні, його багаторазове прикладання в одну і ту ж точку не призводить до значного розширення пластичного відбитка. Проте, при ударному вдавлюванні, зі зростанням кількості ударів до 15–20, розмір відбитка збільшується в 1,25–1,55 рази за різних умов обробки. Для сталей з високою твердістю цей приріст буде меншим, а діаметр кулі при цьому не впливає на результат [94,96]:

$$d_{\max} / d \equiv 1.55 - HB / 1000 . \quad (3.7)$$

Глибина зони наклепу, сформована внаслідок ударного вдавлювання кулі, є майже ідентичною глибині, отриманій при одноразовому статичному вдавлюванні, за умови рівності діаметрів утворених відбитків. Тому залежності параметрів від глибини наклепованого шару, розроблені для статичного режиму, можуть бути використані і для ударного навантаження, якщо врахувати зміну енергії удару E_y та коефіцієнта пластичності ε (рис. 3.13).

Крім корисної роботи деформації, ударник витрачає енергію на пружний відскік та компенсацію сил тертя. З цієї причини, при обробці конструкційних сталей, потенційна енергія ударника має бути на 15–20 % вищою за корисну роботу деформації.

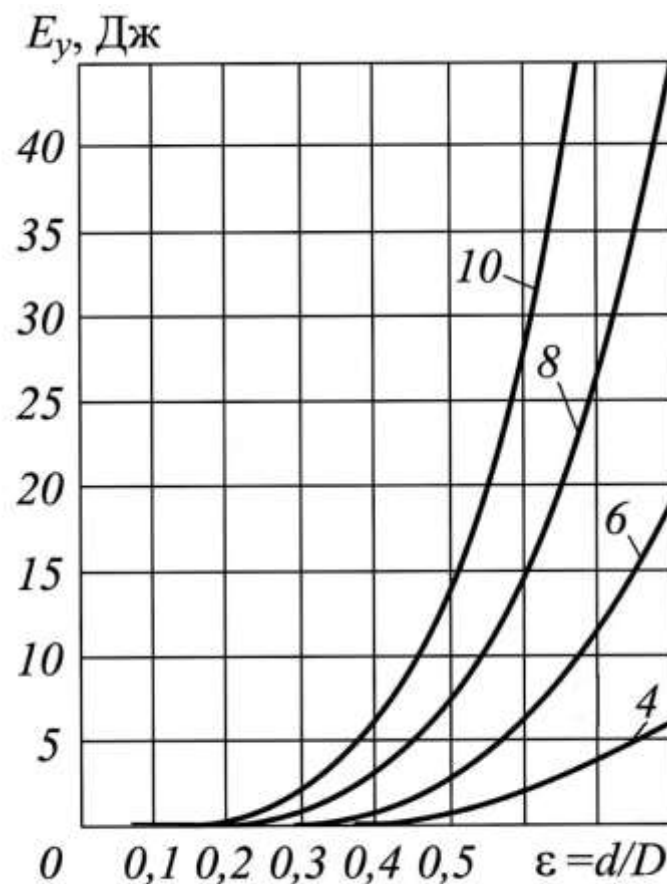


Рисунок 3.13 – Залежність енергії одноразового динамічного вдавлювання E_y сферичної кулі від ступеня деформування ε для куль різних діаметрів (матеріал – сталь 50, 65Г)

Джерело: сформовано автором

Енергія пружного відскоку ударника E_B визначається такими параметрами, як маса та жорсткість оброблюваної деталі, а також властивостями її матеріалу, і може становити 25–30% або більше. За допомогою сили стиснення пружини F_{cp} та величини ходу ударника X , можливо досить точно розрахувати потенційну енергію ударника E_{II} та енергію удару E_y .

$$E_{II} = F_{cp} \cdot X = E_y + E_B \quad (3.8)$$

Оптимальна енергія удару E_y вибирається залежно від твердості оброблюваного матеріалу та діаметра ударника, що вдавлюється. Загальний діапазон становить 5–80 Дж. Для конструкційних сталей рекомендована енергія удару знаходиться в межах 15–50 Дж. (рис.3.14).

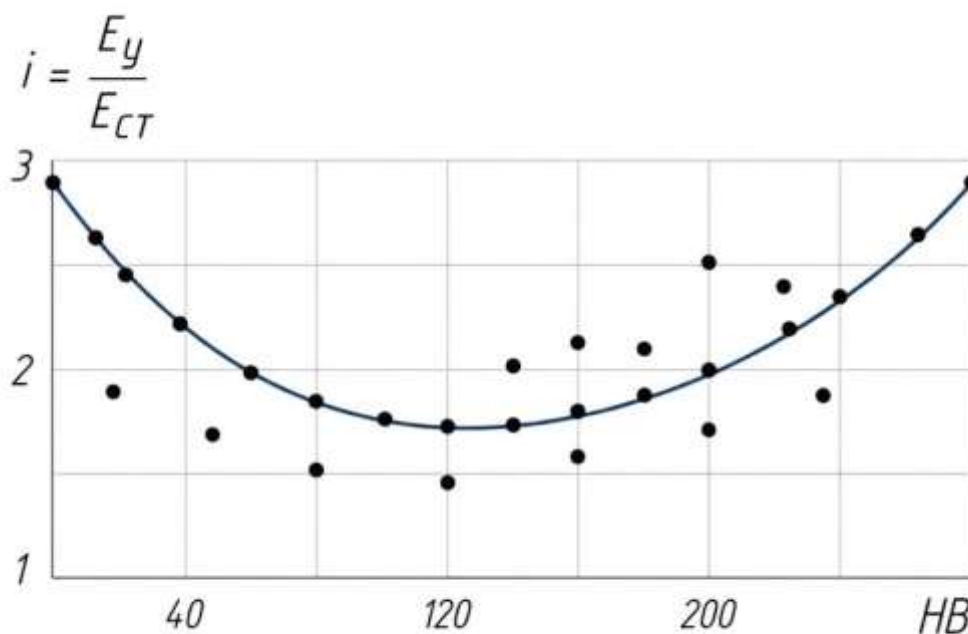


Рисунок 3.14 – Збільшення енергії вдавлювання $J=J_y/J_{cm}$ при ударному навантаженні порівняно зі статичним навантаженням для матеріалів різної твердості

Джерело: сформовано автором

Фізична природа деформаційного зміцнення пояснюється взаємним уповільненням руху дислокацій через інтенсивне зростання їхньої концентрації [49,96,98].

Напруження, потрібне для підтримання пластичної деформації, залежить від густини дислокацій наступним чином:

$$\sigma_d = \alpha G b \sqrt{\rho} \quad (3.9)$$

де α – коефіцієнт, який залежить від природи металу, його кристалографічної орієнтації, структури і внеску різних механізмів гальмування дислокацій в загальне зміцнення G – модуль зсуву; d – вектор Бюргерса; b – густина дислокацій [58,62,94].

Густина дислокацій інтенсивно зростає в міру збільшення ступеня деформації:

$$\rho = \rho_0 + C \varepsilon^\alpha \quad (3.10)$$

де ρ_0 – початкова густина дислокацій; C і α – коефіцієнти та параметри, які залежать від типу кристалічної ґратки й інших реальних умов деформування; ε – ступінь деформування.

Для ряду металів спостерігаються наступні типові показники зазначених величин:

$$\alpha = 1,0 \pm 0,5 \quad (3.11)$$

$$\rho_0 = (10^5 \dots 10^7) \text{ см}^{-2} \quad (3.12)$$

$$C = 10^{8 \pm 1} \text{ см}^{-2} \quad (3.13)$$

Коли ступінь деформації ($\varepsilon \rightarrow 1$) значний, густина дислокацій стрімко збільшується, досягаючи граничних показників:

$$\rho = (10^{12} \dots 10^{14}) \text{ см}^{-2} \quad (3.14)$$

Рух дислокацій у кристалі ускладнюється завдяки енергетичним бар'єрам, які створюються іншими дислокаціями або їхніми скупченнями.

Деформаційне зміцнення відбувається головним чином через гальмування, спричинене пружною взаємодією дислокацій. Зміцнення стає виразним і швидко зростає з моменту, коли припиняється ковзання в нових площинах, які перетинають вихідну систему площин ковзання.

3.5. Висновки з 3 розділу

Розроблено модель гідроімпульсного пристрою, що забезпечує механіку процесу деформаційного зміцнення деталей, робочих органів ґрунтообробної техніки з метою підвищення їхньої зносостійкості та довговічності в умовах інтенсивного абразивного зношування.

Установлено, що пластична деформація в поверхневому шарі полікристалічних матеріалів (сталь 50, сталь 65Г) призводить до деформаційного зміцнення, що супроводжується зміною форми та орієнтації зерен, утворення текстури деформації і забезпечує анізотропію властивостей механічних характеристик.

Досліджено методи поверхневої пластичної деформації з використанням гідроімпульсного приводу, що підтвердили їх ефективність для формування напружено-деформованого та фізичного стану поверхневого шару. Забезпечує підвищену твердість, сприятливий розподіл залишкових напруг стиску, підвищуючи зносостійкість та втомну міцність.

Установлено, що при ударному навантаженні коефіцієнт пластичної деформації ε є максимальним на поверхні дії ударника ($\varepsilon_{max} = 2,7$) та мінімальним при заглибленні ($\varepsilon_{min} = 0,1$), з максимальною глибиною деформації поверхневого шару для сталі 65Г, що становить 1,5 мм. Визначено, що для конструкційних сталей оптимальне значення енергії удару становить 15–50 Дж.

Аналіз показав, що гідроімпульсний прес для деформаційного зміцнення забезпечує регульовані параметри навантаження, дозволяє вирішувати спектр виробничих завдань порівняно з пресами з механічним приводом.

Модель гідроімпульсного пристрою, яка базується на принципах поверхнево-пластичної деформації та використанні ГП, підтверджує можливість ефективного деформаційного зміцнення деталей, що є важливим для підвищення експлуатаційних характеристик та терміну служби ґрунтообробної та іншої техніки, схильної до абразивного зносу.

РОЗДІЛ 4. ВИРОБНИЧЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОІМПУЛЬСНОГО ПРИВОДУ

4.1. Дослідно-виробничі випробування гідроімпульсного приводу

Під час проведення поверхневого деформування і послідовного зміцнення поверхневих шарів у матеріалі спостерігаємо кілька процесів, які сприяють покращенню фізико-механічних характеристик металу [87,94,97]. Ці процеси включають структурні перетворення, подрібнення зерен та утворення залишкових напруг стиску в поверхневому шарі. Ці залишкові напруги виникають внаслідок розвитку зсувів у кристалічній ґратці матеріалу. Спільні фактори цих явищ визначають експлуатаційні властивості деталей.

Основні цілі, поставлені перед виробничими дослідженнями:

- з'ясування фактичних закономірностей функціонування преса з електрогідравлічним управлінням: перевірка його здатності генерувати імпульсне навантаження, а також оцінка коректності роботи як при параметричному налагодженні, так і при дотриманні визначеного закону зміни гідравлічного потоку;
- оцінка відповідності розроблених математичної та динамічної моделей гідроімпульсного приводу пристрою для радіального віброударного впливу (з ГІТ), а також перевірка експериментального прототипу конструкції пристрою;
- встановлення кількісних відносних різниць між результатами, отриманими теоретичним шляхом, та даними, зафіксованими експериментально.

Під час проведення виробничих досліджень пресу з електрогідравлічним керуванням для формоутворення необхідно визначити:

- 1) відповідність експериментальних і заданих параметрів вібронавантаження столу (амплітуди та частоти);
- 2) закон зміни частоти проходження імпульсів тиску в напірній порожнині приводу під час подачі сигналу на електромагніт електрогідравлічного клапана;

3) установити залежність амплітуди та частоти вібраційного столу пресу під час параметричного налаштування запуску електрогідравлічного клапана;

4) установити залежність амплітуди та частоти вібрацій вібростолу вібропресу від зміни частоти та скваженості подачі сигналів на електромагніт електрогідравлічного клапана;

5) технічні можливості пресу з електрогідравлічним керуванням для формоутворення;

6) технологічну придатність та ефективність пресу з електрогідравлічним керуванням для формоутворення.

Проведення досліджень здійснювалося на базі дослідного зразку пресу ІП-16.

Методика проведення виробничого дослідження гідроімпульсного приводу з програмованим керуванням будувалась згідно зі структурною схемою [100,101,102], показаною на рисунку 4.1.

Під час підготовки дослідного зразка пресу з електрогідравлічним керуванням, до не виробничих досліджень виконувалися такі роботи:

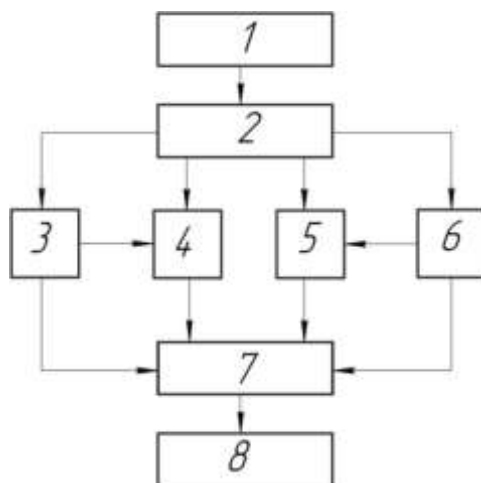


Рисунок 4.1 – Структурна схема методики проведення виробничого дослідження: 1 — підготовка дослідного зразка до проведення експериментальних досліджень; 2 — планування та проведення експериментів; 3 — 6 реєстрація динамічних параметрів дослідного зразка пресу з електрогідравлічним керуванням для формоутворення заготовок на різних режимах робочого процесу; 7 — обробка результатів вимірювань

**та оцінка їх точності; 8 — побудова за результатами вимірювання
експериментальних графічних залежностей**

Джерело: сформовано автором

- 1) підготовка пресу ІІ-16 для роботи в експериментальному стенді (перевірка та регулювання натягу пружин, що кріпляться до стола, перевірка зміни об'єму гідроаккумулятора та точності переміщення вузлів пресу);
- 2) монтаж на досліджуваному стенді датчиків тиску та переміщення;
- 3) перевірка працездатності блоку керування;
- 4) перевірка працездатності електрогідравлічних клапанів.
- 5) установка та закріплення за допомогою перехідної плити, електрогідравлічного клапана УЕГ.С-200 (додаток В);
- 6) встановлення біля дослідного стенда комплексу вимірювально-реєстраційної апаратури та під'єднання до пристрою датчиків;
- 7) обнулення всіх компонентів експериментального стенду, а також налагодження та прогрівання вимірювально-реєстраційної апаратури;
- 8) перевірка працездатності систем стенда, системи керування та вимірювального обладнання в режимах холостого ходу;
- 9) Здійснення тестової реєстрації динамічних параметрів на різних режимах роботи обладнання. Мета – вибір найкращих параметрів реєстрації, зокрема, оптимальної часової розгортки для осцилограм зміни тиску в порожнинах приводу та осцилограм переміщення.

Можливість параметричного налагодження експериментального стенда попередньо перевірялась на тарувальному стенді НТЦ-11.38 (додаток Г). Датчик тиску встановлювався у нагнітальну гідролінію експериментального стенда та проводився експеримент [101,103,104].

Закономірність зміни частоти та амплітуди вібрацій виконавчої ланки визначалась залежно від зміни вхідного сигналу (частоти та її сквапності, що регулює співвідношення часу, в якому золотник перебуває у закритому чи відкритому положенні) з блоку керування на електромагніт

електрогідравлічного клапана. Отримані дані фіксувались і записувались на жорсткий диск при різних частотах роботи електрогідравлічного клапана, і на кожній частоті, було змінено скваженість вхідного сигналу.

Для забезпечення достовірності експериментальних даних (частоти та амплітуди вібрацій) пресу з електрогідравлічним керуванням, число n вимірювань одного параметра в заданому режимі розраховувалося за такою формулою [58]:

$$n \geq (1 + P_d + 2n_{\text{пп}}) \cdot (1 - P_d)^{-1}, \quad (4.1)$$

де $n_{\text{пп}}$ – число явно недостовірних значень параметрів (велткі похибки), які не беруться до уваги; P_d – довірча ймовірність того, похибка вимірювання параметра не виходить за допустимі межі, називається довірчою. При використанні нормальної квантильної оцінки повної та випадкової похибок вимірювальної апаратури рекомендовано обирати довірчу ймовірність в діапазоні $P_d = 0,8-0,9$, тоді за $n_{\text{пп}} = 0$; $n \geq [1 + (0,8...0,9)] \cdot [1 - (0,8...0,9)]^{-1} = 9...19$.

Випадкова похибка при вимірюваннях підпорядковується закону, близькому до нормального. Це дало змогу застосувати статистичні формули для визначення істинного значення вимірюваного параметра за осцилограмою та його середньої квадратичної похибки [100]:

$$a \approx \bar{x} = n^{-1} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (4.2)$$

$$\sigma \approx \sqrt{(n-1)^{-1} (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4.3)$$

де x_i та $\bar{x}$ – відповідно, виміряне та середньоарифметичне значення параметра.

Загальна похибка експериментального параметра накопичується вздовж усього вимірювального ланцюга, що включає датчик, АЦП та ПК.

Вона складається з: систематичних, інструментальних, методичних та випадкових компонентів похибки. Середньоквадратичне значення цієї сумарної похибки σ_{Σ} є кількісною мірою її величини [104]:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\delta_D^2 + \delta_{\Pi}^2 + \delta_{\text{АЦП}}^2}, \quad (4.4)$$

де δ_D - похибка датчика; δ_{Π} – сумарна похибка ПК; $\delta_{\text{АЦП}}$ – АЦП.

4.2. Виробничі дослідження закономірностей робочих режимів гідроімпульсного приводу

Виробниче дослідження проводилось у декілька етапів для можливості отримання даних щодо параметричного і регульованого керування пресом.

У першому випадку, для параметричного налаштування системи керування попередньо датчик тиску встановлювався у тарувальному стенді, де шляхом ручної зміни тиску в системі, перевіряли достовірність можливості такого керування. Після отримання позитивного результату, датчик тиску встановлювали у нагнітальну гідролінію, й експеримент повторювався у робочому режимі експериментального стенда. Для перевірки можливості параметричного режиму керування експеримент проводився при різних подачах, які регулював розподільувач потоку рідини [105,105].

Після подальшого дослідження було встановлено, що через перехідні процеси, які відбувається у напірній гідролінії, система керування не може адекватно працювати, оскільки під час зростання тиску до заданого значення відбувається викид сигналу, який фіксується у блоці керування і з якого подається відповідний сигнал на електромагніт електрогідравлічного клапана, який забезпечує переміщення золотника у «відкрите» положення.

Це сприяє чого відбувається миттєвому перетіканню рідини з нагнітальної гідролінії у робочу порожнину виконавчого циліндра. Під час такого перетікання спостерігаємо перехідний процес: тиск у гідролінії миттєво знижується і досягає значення, при якому з блоку керування йде відповідний сигнал на електромагніт електрогідравлічного клапана, і золотник повинен переміщатись у «закрите» положення, в якому відбувається перетікання рідини з робочої порожнини виконавчого гідроциліндра у бак.

Отримані результати у вигляді графіків представлені на рисунку 4.2.

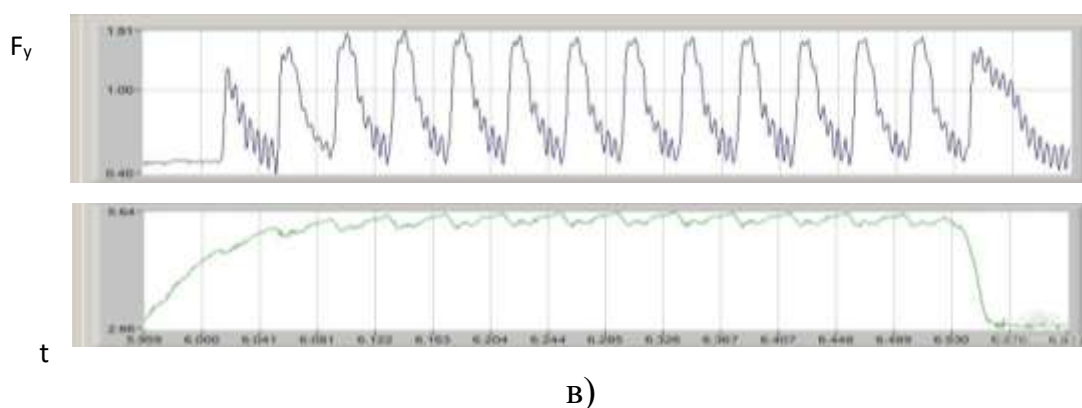
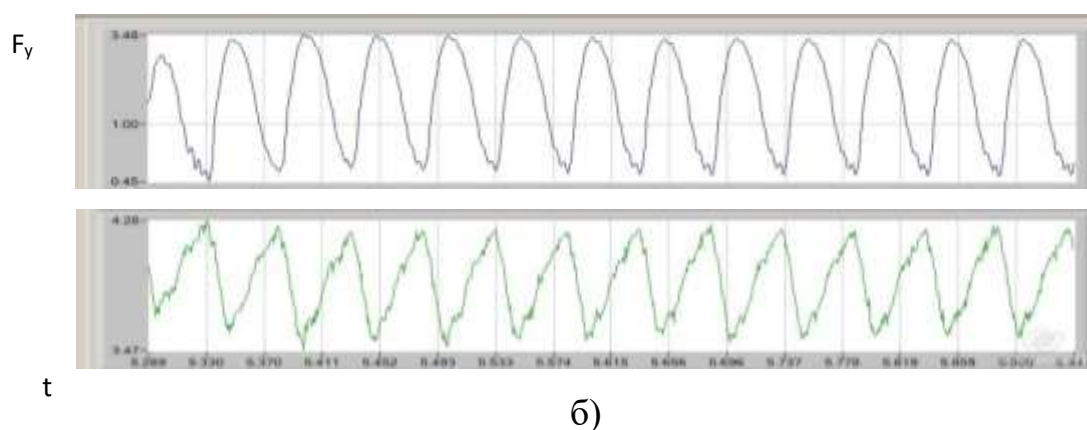
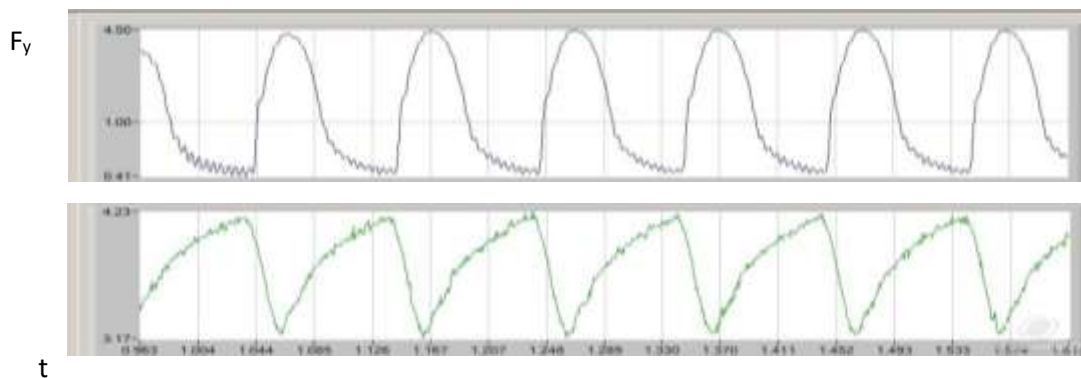


Рисунок 4.2 – Графіки послідовності зміни діаметра ударника і вхідного сигналу: а) – діаметр 10 мм; б) – діаметр 8 мм; в) – діаметр 6 мм; F_y – сила ударної взаємодії ударника наконечника; t – час

Джерело: сформовано автором

Проте через перехідний процес і миттєве додаткове вливання об'єму рідини з гідроаккумулятора тиск знову досягає заданого верхнього значення, при якому золотник має рухатись у «відкрите» положення, хоча за часом він ще не

перемістився у «закрите» положення. Після цього відбувається «задирання» стола.

Під час малих подач золотник встигає повертатись у «закрите» положення і рідина з виконавчого гідроциліндра витікає у бак, проте частота і сила переміщення стола не відповідають імпульсному типу навантаження, що не дозволяє отримати потрібних технологічних параметрів [105,107,108].

Для перевірки працездатності експериментального дослідження проводились у такій самій послідовності зміни діаметра ударника і вхідного сигналу. В процесі виконавчої дії процесу моменту удару, враховується робочий тиски в гідролінії і для забезпечення зворотно-поступальної дії ударника враховувати амплітуду і частоту удару. Критерієм вибору частоти і амплітуди удару являється F_y сила ударної взаємодії ударника.

Отримані результати дослідження говорять про те, що за допомогою цієї системи керування, яка складається з блоку керування та електрогідравлічного клапана, можна отримати вібрації на виконавчій ланці в межах від 1 до 60 Гц, з амплітудою коливань до 4 мм.

Величина амплітуди та частоти залежать від подачі гідронасосом. При максимальній подачі насоса оптимальним діапазоном регулювання є частота в межах 20-35 Гц з амплітудою вібрацій до 2 мм, що дозволяє отримати імпульсний тип навантаження рисунок 4.2. При зменшенні подачі частота вібрацій, при яких не відбувається «задирання» столу, збільшується до 50, але амплітуда зменшується до 1 мм. При подальшому зменшенні подачі частота вібрацій залишається на тому ж рівні, але амплітуда та сила набувають пульсаційного характеру.

4.3. Механізм деформаційного зміцнення при динамічному поверхнево-пластичному деформуванні

Під час механічної обробки навантаження прикладається на межі розділу інструмент-деталь. При цьому найбільш серйозні мікроструктурні зміни відбуваються на дуже малих глибинах під щойно обробленою поверхнею [94,96,108]. Одночасне виникнення термічних і механічних ефектів різної величини в типових умовах деформації.

Мікроструктура поверхонь після помірної та агресивної деформації суттєво різняться.

При звичайній механічній обробці (за помірних теплових і механічних навантажень) глибина зміцненого шару матеріалу (шар опору) становить 11–15 мкм (рис. 4.3). Така глибина спостерігалася при використанні вставок з полікристалічного кубічного нітриду бору та цементованого карбїду.

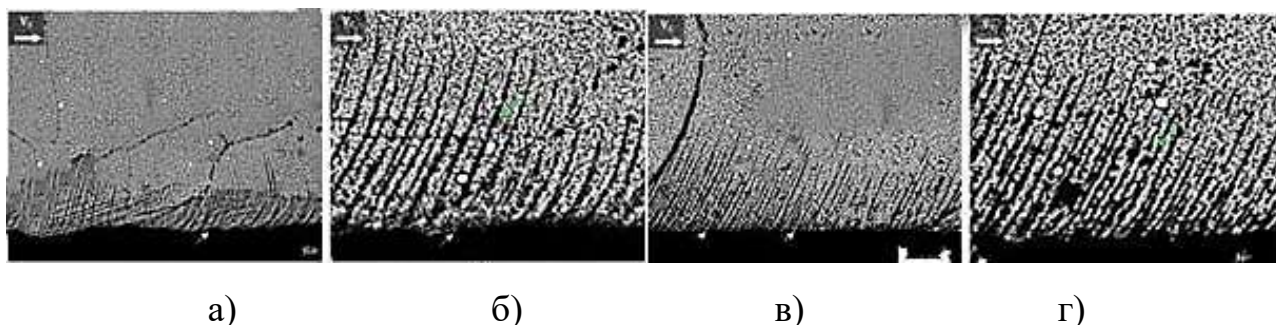


Рисунок 4.3 – Мікроструктурна цілісність поверхні в результаті звичайних умов пластичного деформування; а – опір матеріалу, спричинений проміжними тепловими ефектами та механічними впливами низької інтенсивності; б – деталі слідів деформації, спричинених термічними ефектами низької інтенсивності та проміжними механічними впливами на поверхні заготовки; в – опір матеріалу, викликаний помірними тепловими ефектами та проміжними механічними впливами; г – деталі слідів деформації, спричинених помірними термічними та проміжними механічними впливами

Джерело: сформовано автором

Ці помірні значення контрастують із глибиною 24–28 мкм та типом мікроструктурних змін, викликаних агресивною деформацією. Агресивний вплив формує не лише товстий зміцнений шар, а й білі шари у підповерхні, що свідчить про значно більші структурні порушення.

Зміцнений шар, створений помірною деформацією (карбідними чи полікристалічного кубічного нітриду бору інструментами), демонструє дуже подібні характеристики, незважаючи на різну комбінацію термомеханічних чинників.

Обидва випадки показують щільне скупчення вузьких слідів деформації, які поширюються від поверхні углиб (рис. 4.3, в і г). Це явище пов'язане з істотним викривленням кристалічної ґратки [96] через пластичні процеси, спричинені обробкою.

Зміцнення матеріалу також визначається тим, що сукупність внутрішніх напружень (за умови високої густини дислокацій) здатна досягати місця генерації дислокацій і чинити на нього опір, спрямований протидіюче зовнішньому навантаженню.

В процесі пластичної деформації зерна деформуються нерівномірно внаслідок різної орієнтації відносно діючої сили та відмінного рівня міцності. Зміна геометрії зерен призводить до зміни їхнього просторового положення, що викликає зміщення на межах зерен. За високих температур зміщення на межах зерен стають більш значущими. У цьому випадку зміщення між зернами посилюються за рахунок проковзування по межі, яке не пов'язане зі зміною форми самих зерен.

Механізм деформування на межах зерен залежить від їхньої будови. У малокутових межах з дислокаційною структурою зміщення відбувається по поверхні контакту дислокацій.

Зміщення на межах зерен значно посилюється за високої температури. Тут, на додаток до зсувного механізму, важливу роль починає виконувати механізм дифузійної пластичності, в якому ключовим механізмом переміщення є вакансії.

Деформаційне зміцнення проходить три фази, і його хід визначається характером руху дислокацій при пластичному деформуванні (рис. 4.4). [96,110].

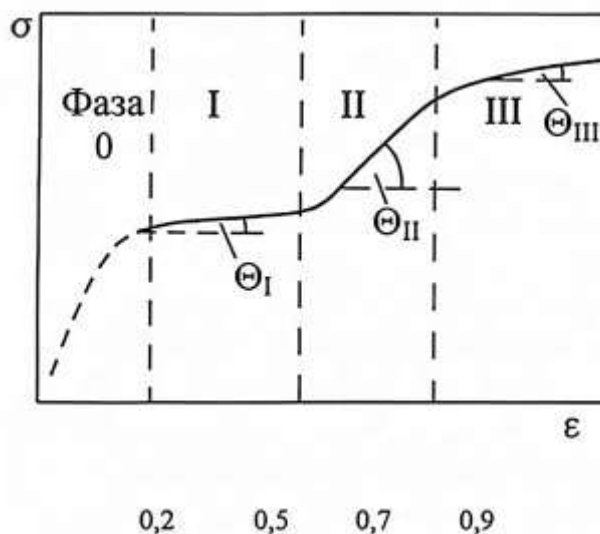


Рисунок 4.4 – Крива деформаційного зміцнення металу (матеріал сталь 65Г)

Джерело: [96]

Фаза I (Легке ковзання): низький коефіцієнт деформаційного зміцнення на цій початковій фазі вказує на те, що дислокації рухаються переважно в одній системі. При малій початковій густині дислокацій, кількість бар'єрів, полів пружних напружень і порогів є відносно невеликою і лише слабо збільшується відповідно до деформації.

Фаза II (Множинне ковзання): на другій фазі різко зростає густина дислокацій, збільшується кількість їхніх перетинань. Як наслідок, зростає число бар'єрів, потужність скупчень і сплетінь. Ці фактори, гальмуючи рух дислокацій, призводять до збільшення коефіцієнта деформаційного зміцнення.

Фаза III: ця фаза починається, коли напруження досягає рівня, достатнього для виникнення масового поперечного ковзання. До моменту початку Фази III ковзання в усіх системах було загальмоване різними структурними бар'єрами.

Подальше деформування матеріалу здійснюється завдяки переміщенню гвинтових дислокацій, які долають бар'єри шляхом поперечного ковзання.

Наслідком ініціації цього процесу є зменшення коефіцієнта зміцнення. Спостерігається явище динамічної деформації, яке підтримується масовим

знищенням дислокацій через збільшення шансів зустрічі дислокацій протилежного знаку в спільній площині.

Пластична деформація може бути досягнута як ударною, так і статичною взаємодією інструмента із заготовкою.

Ударне вдавлювання вимагає в 1,7–2,8 рази більше енергії, ніж статичне, причому точне співвідношення залежить від твердості оброблюваного матеріалу. Однією з причин цього є те, що збільшення швидкості навантаження скорочує час протікання пластичної деформації. Це призводить до вищого рівня напруги, при якому відбувається перехід від пружної до пластичної деформації.

Зі збільшенням швидкості удару до 7,8 м/с динамічна межа міцності сталі інтенсивно зростає. При подальшому підвищенні швидкості ця межа міцності змінюється незначно [109,110].

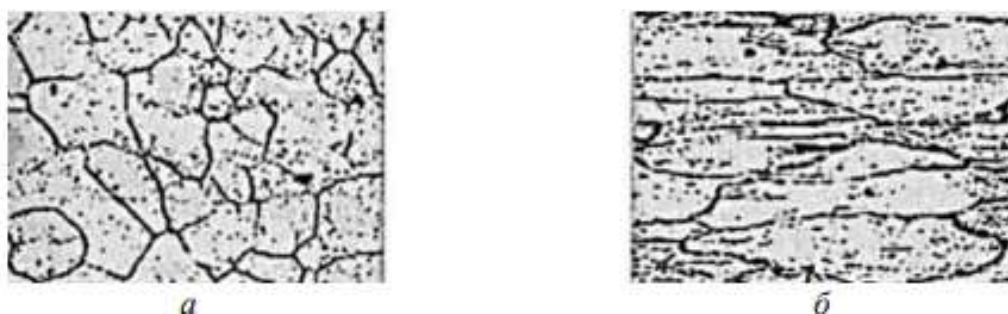


Рисунок 4.5 – Відмінності в структурі заліза під час пластичної деформації сталі 65Г: а – початковий стан; б – зміна форми зерен матеріалу за умов значної пластичної деформації

Джерело: сформовано автором

Крива залежності напруженості від деформації для динамічного навантаження проходить вище, ніж відповідна крива для статичного навантаження (рис. 4.5). Хоча межа пружності при одноразовому ударі залишається майже незмінною, межі текучості та міцності суттєво підвищуються. Прискорення навантаження до 100 м/с призводить до значного зростання межі текучості: наприклад, залізо армко демонструє збільшення в 3,4 рази, сталь 50 – в 3 рази, а сталь 65Г – в 2,8 рази.

Межа міцності термооброблених вуглецевих сталей зростає на 43%, тоді як для заліза армо цей приріст становить 55%. Це свідчить про обернену залежність: чим вища початкова твердість матеріалу, тим менш інтенсивно змінюються зазначені характеристики. Найменше ці характеристики змінюються для високоміцних сталей.

Визначення кількості і розмірів зерен може дати уявлення про міцність, пластичність, і загальну стійкість металу до зовнішніх навантажень (рис. 4.5). Дрібнозернисті матеріали, як правило, мають кращі механічні властивості, оскільки їх зерна краще перешкоджають виникненню тріщин і деформацій.

При пластичному деформуванні металу підвищується стійкість. Пластичність забезпечує конструкційну міцність деталі під навантаженням і нейтралізує вплив концентраторів напруг (рис. 4.6). Пластична деформація виникає при зростанні навантаження, оскільки метал зміцнюється в процесі деформування [96,97].

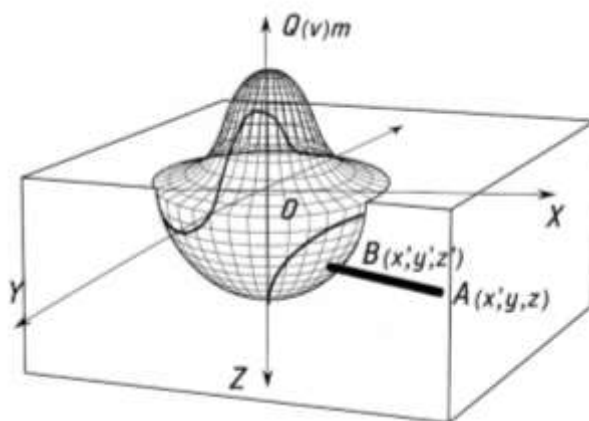


Рисунок 4.6 – Схема дії індентора на відновлювальну поверхню

Джерело: сформовано автором

У площині ковзання ударника розміщується багато зон дислокацій. Їх послідовне переміщення вздовж площини ковзання розвиває процес пластичної течії. Із підвищенням деформації ковзання поширюється на інші системи і виникає множинне ковзання. На цій стадії дислокації переміщуються, що призводить до підвищення опору їх руху і створює складну дислокаційну структуру.

Обробка методом ППД спричиняє складні структурні та фазові перетворення, які є визначальними для формування поверхневого шару. На початковому етапі відбувається подрібнення зерен металу на блоки (полігонізація), що призводить до утворення мозаїчної структури. Згодом, внаслідок інтенсивного розвитку зсувів на площинах ковзання, формуються нові, значно дрібніші зерна. При цьому кристаліти втрачають свою глобоїдну форму: вони сплющуються та витягуються відповідно до напрямку деформування. Різке порушення співвідношення їхніх розмірів призводить до створення впорядкованої орієнтованої структури волокнистого характеру. Ця структура наділена анізотропними механічними властивостями, що проявляється у вищій пластичності вздовж волокон, ніж у поперечному напрямку.

Отримані дані допомагають виявити закономірності між технологічними процесами та характеристиками готової продукції, що є основою для оптимізації виробництв, покращення якості матеріалів і підвищення їх експлуатаційних властивостей [102,107,110].

Локальна область проведення експерименту вибиралася в два етапи: визначення основного рівня і інтервалі варіювання. Основний рівень багатомірна точка в векторному просторі, що задавалася комбінацією рівнів факторів. Будування плану експерименту зводилося до вибору експериментальних точок, симетричних відносно основного рівня. Ситуація задавалася інформацією по найкращих точках і визначалось рішення задач. Вибір інтервалів варіювання факторів відображалось точками на координатній осі симетричними відносно основного рівня (табл. 4.1).

Таблиця 4.1.

Рівні факторів і кореляція даних

Фактор	Рівні факторів			Інтервал варіювання
	-1	0	+1	
Деформаційне зміцнення, X_1	0,08	0,24	0,4	0,16
Глибина наклепаної зони, X_2	0,4	1,8	3,2	1,4
Кількість ударів, X_3	2	10	18	8
Ширина оброблюваної поверхні, X_4	3	15	27	12

Джерело: сформовано автором

Після обробки експериментальних даних було підтверджено рівняння регресії, яке наведене в натуральних величинах.

Рівняння регресії в кодованих (безрозмірних) змінних для двовимірної матриці має вигляд:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{12}X_1X_2 \quad (4.5)$$

Коефіцієнти b_i розраховуються за формулою:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N Y_j \cdot x_{ij}}{N} \quad (4.6)$$

де $N=9$ (кількість експериментів).

Таблиця 4.2

Двовимірна матриця планування експерименту

№	Фактори в безрозмірній системі координат		Еу, Дж
	X_1	X_2	
1.	+1	+1	38
2.	+1	-1	5
3.	-1	-1	0,8
4.	-1	+1	2,8
5.	0	+1	28
6.	0	-1	24,5
7.	+1	0	16,5
8.	-1	0	10,5
9.	0	0	5,8

Джерело: сформовано автором

Перехід від кодованих змінних x_i до натуральних величин X_i здійснюється за допомогою оберненого перетворення:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i} \quad (4.7)$$

де: x_i – кодоване значення фактора i ;

X_i – натуральне значення фактора i ;

X_{i0} – значення фактора i на базовому (нульовому) рівні в натуральних одиницях;

ΔX_i – інтервал варіювання фактора i .

Рівняння регресії у кодованих значеннях:

$$E_y = -10.2667 + 11.425X_1 + 9.7X_2 + 4.4833X_1^2 + 16.05X_2^2 + 7.75X_1X_2 \quad (4.8)$$

Для тривимірної матриці планування експерименту рівняння регресії буде мати вигляд:

$$Y = b_0 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_3X_4 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{44}X_4^2 \quad (4.9)$$

Таблиця 4.3

Тривимірна матриця планування експерименту

№	Фактори в безрозмірній системі координат			НВ
	X ₂	X ₃	X ₄	
1.	-1	-1	-1	340
2.	-1	-1	0	365
3.	-1	-1	+1	378
4.	-1	0	-1	384
5.	-1	0	0	380
6.	-1	0	+1	369
7.	-1	+1	-1	374
8.	-1	+1	0	358
9.	-1	+1	+1	362
10.	0	-1	-1	370
11.	0	-1	0	382
12.	0	-1	+1	372
13.	0	0	-1	418
14.	0	0	0	422
15.	0	0	+1	395
16.	0	+1	-1	405
17.	0	+1	0	412
18.	0	+1	+1	408
19.	+1	-1	-1	388
20.	+1	-1	0	412
21.	+1	-1	+1	419
22.	+1	0	-1	394
23.	+1	0	0	383
24.	+1	0	+1	389
25.	+1	+1	-1	401
26.	+1	+1	0	398
27.	+1	+1	+1	423

Джерело: сформовано автором

Рівняння регресії тривимірного планування експерименту у кодованих значеннях:

$$HB = 387.11 + 15.61X_2 + 5.39X_3 + 5.78X_4 + 2.42X_2X_3 + 1.58X_2X_4 - 2.83X_3X_4 - 5.83X_2^2 + 17.17X_3^2 - 7.33X_4^2 \quad (4.10)$$

При практичному впровадженні зміцнення робочої поверхні деталі при поверхнево-пластичному деформуванні необхідно чітко визначатися з геометричними параметрами ударника при здійсненні гідроімпульсного удару для підвищення пластичності і твердості, що буде задовольняти підвищення зносостійкості без термічного впливу деталей [111,112,113]. ППД забезпечується енергією удару, що дозволяє визначати зону деформації дії ударника при пластичному деформуванні робочого леза деталі (рис. 4.7-4.10).

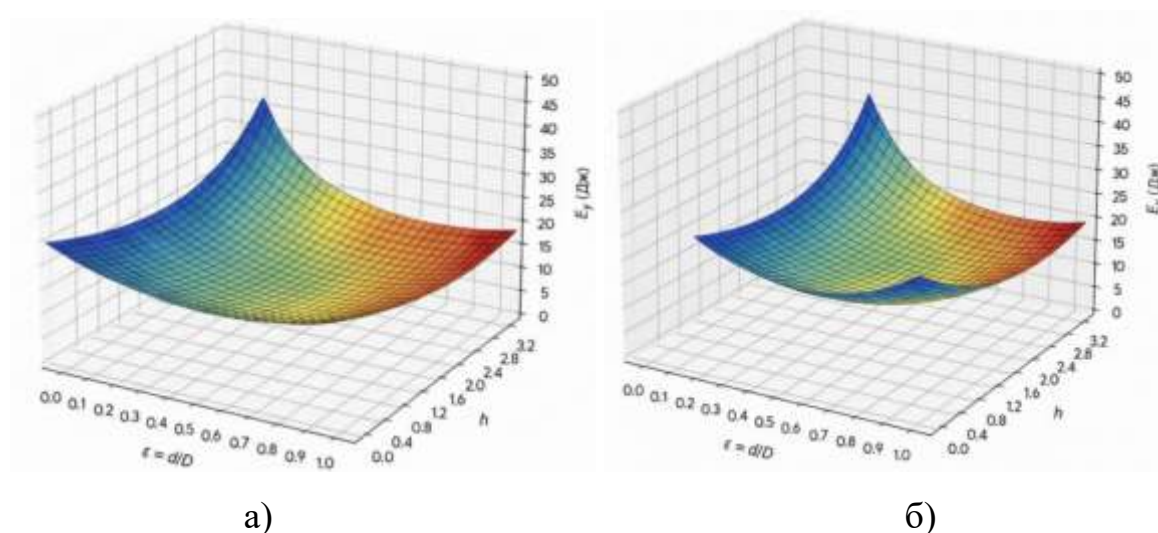


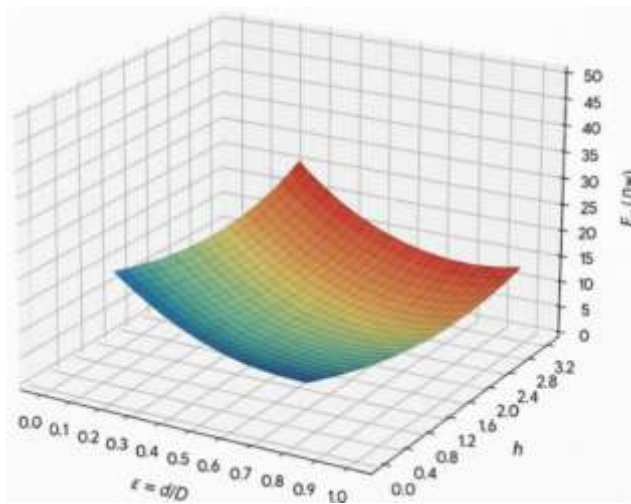
Рисунок 4.7 – Графік залежності динамічного тиску ударника Ø4:

а) Сталь 50; б) Сталь 65Г

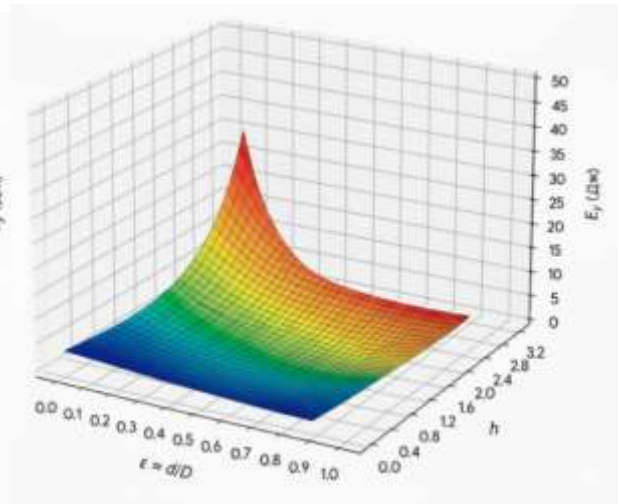
Джерело: сформовано автором

Для повного аналізу та визначення зон деформації використовуються ударники діаметром 4, 6, 8, 10 мм, що дозволяє вибрати оптимальний діаметр 10 мм, що дає змогу створювати напружені зони без суттєвого впливу на зону деформації.

Характер зміни механічних властивостей металу поверхневого шару при динамічному вдавлюванні ударника зображено на рисунках 4.7-4.10.



а)

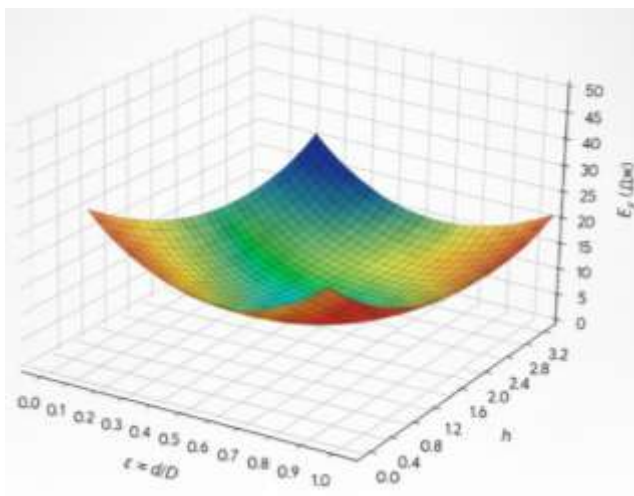


б)

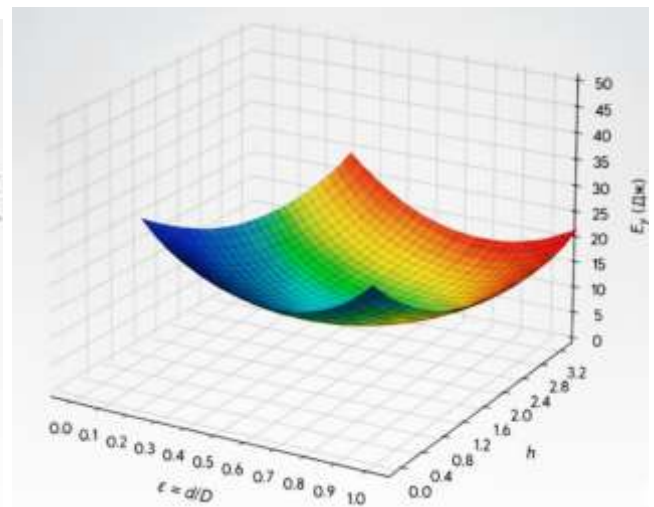
Рисунок 4.8 – Графік залежності динамічного тиску ударника Ø6:

а) Сталь 50; б) Сталь 65Г

Джерело: сформовано автором



а)



б)

Рисунок 4.9 – Графік залежності динамічного тиску ударника Ø8:

а) Сталь 50; б) Сталь 65Г

Джерело: сформовано автором

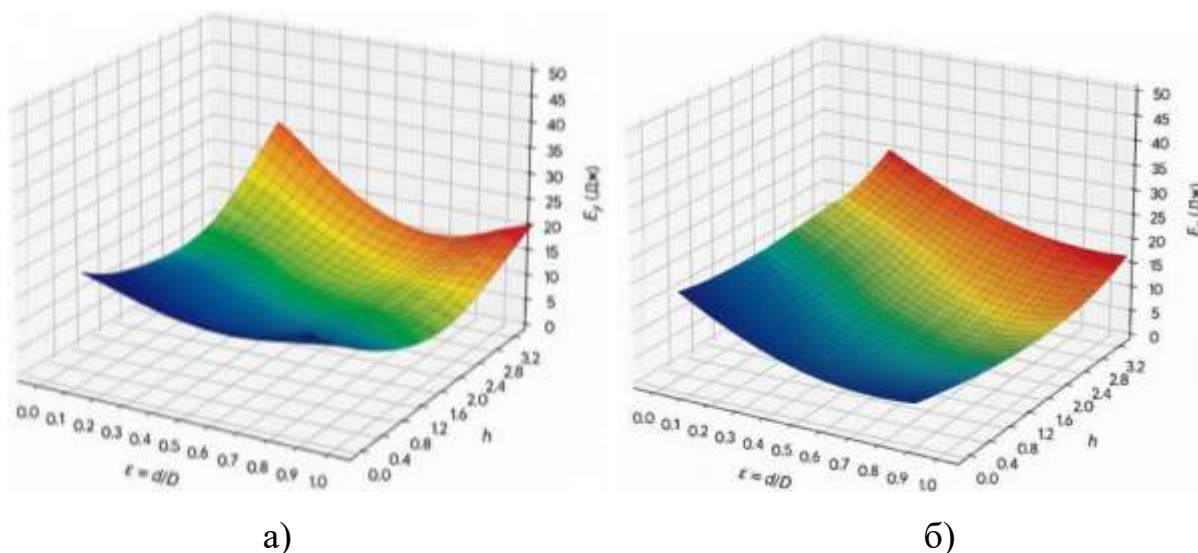


Рисунок 4.10 – Графік залежності динамічного тиску ударника $\varnothing 10$:

а) Сталь 50; б) Сталь 65Г

Джерело: сформовано автором

Твердість металу впливає на тривалість роботи деталей. Від твердості значною мірою залежить міцність деталі і стійкість її поверхні до зношення. Пластичність металу при дії гідроімпульсного ударника дозволяє оцінити ударний опір, що спричиняє матеріал і при цьому змінюються твердість і межа міцності кристалічної ґратки металу деталі [113,114].

Головна причина зміцнення полягає у стрімкому розмноженні дислокацій — дефектів ґратки, які збираються біля ліній зсуву, а потім блокуються різноманітними перешкодами, що утворюються під час деформації (наприклад, перехрестя дислокацій або смуги деформування).

Посиленню зміцнення також сприяє фрагментація об'ємів металу між лініями ковзання на блоки, їхній поворот, викривлення площин ковзання та накопичення на цих площинах руйнівних елементів ґратки. Це все разом збільшує шорсткість та опір на площинах ковзання.

Наклеп перенасичених твердих розчинів викликає їх частковий розпад, у результаті чого виділяються дрібні частки нових структурних фаз. Ці частинки, потрапляючи на площини ковзання, блокують подальший розвиток зсувів, посилюючи зміцнення. При деформуванні сталей з ферито-перлітною структурою відбувається розпад твердого розчину α -заліза і вуглецю, при цьому

роль гальмівних центрів виконують карбіди заліза, що виділяються у формі дуже дрібних включень. Також може спостерігатися випадіння сполук азоту — нітридів.

Підвищення твердості під час пластичної деформації сталі з мартенситною структурою гарту пояснюється частковим перетворенням залишкового аустеніту в мартенсит. Питомий об'єм структурних складових зменшується в наступній послідовності: тетрагональний мартенсит, кубічний мартенсит, перліт (сорбіт, троостит), аустеніт. Якщо структурні перетворення, які відбуваються під час обробки (наприклад, перехід аустеніту в мартенсит), супроводжуються збільшенням питомого об'єму, то в матеріалі виникають залишкові стискальні напруження; при зворотному процесі (зменшенні об'єму) формуються залишкові розтягувальні напруження [94,114].

Зростання концентрації точкових і лінійних дефектів кристалічної ґратки, а також субмікроскопічних (безпечних і нешкідливих) тріщин, сприяє збільшенню питомого об'єму металу. Сумарний максимальний приріст питомого об'єму для сталі може досягати 1,1%.

Цей об'ємний приріст зумовлює утворення в наклепаній зоні залишкових напружень стиску, які, залежно від матеріалу та методу обробки, сягають 1200 – 1500 МПа. Глибина залягання цих напружень зазвичай на 10-50% перевищує глибину шару з підвищеною твердістю. Максимальне напруження найчастіше знаходиться безпосередньо на поверхні або на певній відстані від неї (що може бути спричинено тепловими явищами).

При використанні завищених силових параметрів обробки може відбуватися перенаклеп. У результаті цього процесу в поверхневому шарі з'являються небезпечні мікротріщини, імовірно утворюються частинки відшарованого шару металу. Поверхневі зерна сплющуються настільки, що стають майже нерозрізненими. Також різко зростає шорсткість поверхні. Наклеп металу можна частково або повністю усунути за допомогою відпалу (термічної обробки). Перенаклеп – незворотній процес, при якому нагрів не відновлює вихідну структуру металу і його механічні властивості.

Графічне зображення зони деформації визначає траєкторію зони деформування, що домінує в поверхневому шарі металу та відбитку (h) на

поверхні при ударній дії. На високих частотах ударів, напружений стан зростає, і траєкторія зони деформації піддається мікроструктурним дефектам матеріалу, активуючи нові системи зсуву та змінюючи загальний об'єм зони, що зазнає впливу (рис. 4.11, 4.12).

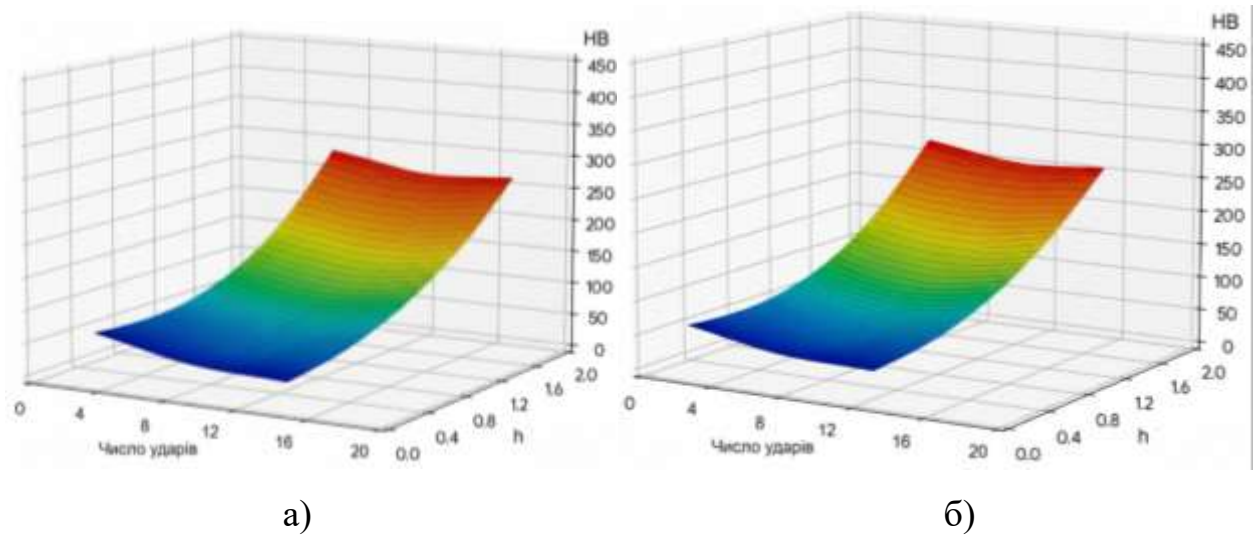


Рисунок 4.11 – Траєкторія зони деформування залежно від частоти ударів ударника Ø8: а) Сталь 50; б) Сталь 65Г

Джерело: сформовано автором

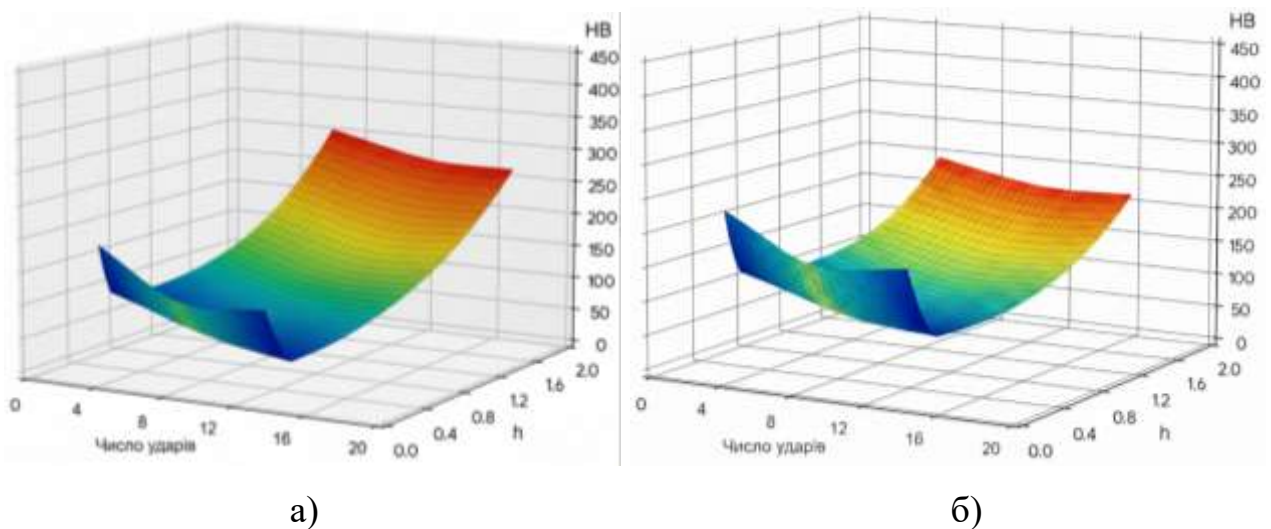


Рисунок 4.12 – Траєкторія зони деформування залежно від частоти ударів ударника Ø10: а) Сталь 50; б) Сталь 65Г

Джерело: сформовано автором

Пластична деформація залежить від траєкторії зони деформування при

частоті ударів ударника, що характерне для процесів, де матеріал зазнає багаторазових високошвидкісних імпульсних навантажень, для зміни геометричних параметрів, пластичності, твердості та фізико-механічних характеристик.

Твердість металу є критичною експлуатаційною характеристикою, що безпосередньо впливає на тривалість роботи відповідальних деталей машин. Твердість відображає міцність матеріалу та його стійкість поверхні до абразивного зношення, що є вирішальним фактором, особливо для ґрунтообробної техніки яка працює в умовах інтенсивного контакту з абразивним середовищем. Для об'єктивної оцінки ступеня довговічності деталей ґрунтообробної техніки, необхідне проведення їх систематичного випробування на твердість [96,114].

У представленому дослідженні застосовується інноваційний підхід, що ґрунтується на гідроімпульсному пристрої для здійснення ударної дії сферичного ударника на поверхню металу (рис. 4.13). Одним із факторів вибору матеріалу для виготовлення робочих органів ґрунтообробних сільськогосподарських машин є матеріал, що забезпечує необхідну стійкість, твердість, пружність та фізико-механічні властивості, тому і вибором матеріалу деталі є сталь 65Г.

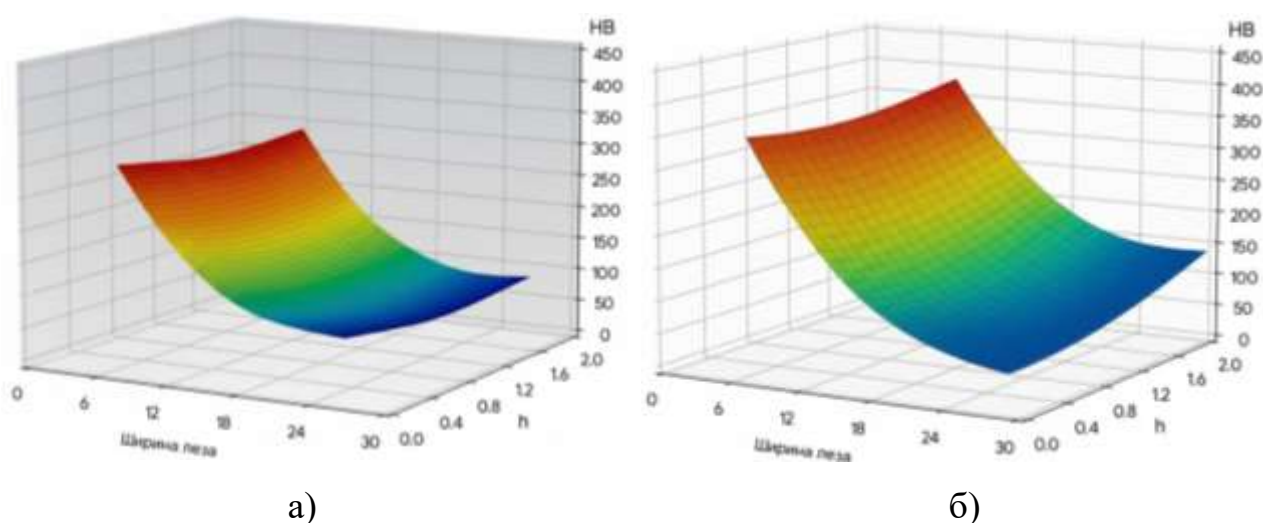


Рисунок 4.13 – Залежність зміни твердості оброблювальної поверхні деталі від деформаційного зміцнення: а) Сталь 50; б) Сталь 65Г

Джерело: сформовано автором

4.4. Дослідження теплового циклу на поверхні заготовки внаслідок пластичної деформації при механічній обробці

Проблему цілісності поверхні заготовки неможливо вирішити лише шляхом встановлення загальних механічних або термічних умов у процесі деформації. Це викликано тим, що неможливо детально врахувати локальні умови, які виникають безпосередньо у контактній зоні між інструментом та поверхнею, що пластично деформується.

Справді, загальні вимірювання (наприклад, сила удару, температура або швидкість деформації) не корелюють однозначно з мікроструктурним процесом пластичної деформації.

Натомість, опис через енергетичні параметри є більш інформативним. Він об'єднує як інтенсивність теплових полів, що розвиваються локально в деформованих підповерхневих об'ємах, так і швидкість їхньої зміни. Цей підхід забезпечує зв'язок між наслідком (швидкість генерації тепла та динаміка теплового поля в третинній зоні зсуву) і першопричиною (пластична деформація під поверхнею) [49,114].

У процесі взаємодії поверхні заготовки з інструментом відбувається пластична деформація у третинній зоні зсуву, внаслідок чого механічна енергія трансформується в теплову. Фактичний характер цього перетворення відображається мікроструктурним станом заготовки, який є ключовим показником цілісності її поверхні. Отже, можна встановити кореляцію між пластичною деформацією в приповерхневому шарі обробленої деталі та розподілом теплових полів, що виникають усередині деталі, особливо в третинній зоні зсуву.

Процес структуризації та перетворення об'ємів матеріалу на поверхневі шари відбувається майже миттєво під час їхнього проходження через межу між інструментом і заготовкою. Наприклад, за швидкості 60 м/хв відстань 0,1 мм перетинається приблизно за 0,2 с.

Металеві об'єми, які надходять до третинної зони зсуву, вже можуть мати підвищену температуру через взаємодію з тепловим полем, що поширюється перед різальним елементом. Коли нова поверхня просувається за інструмент, виникає високотемпературна деформація через тертя об бічну частину інструменту. Це стимулює генерацію тепла внаслідок пластичної деформації, що призводить до появи температурних градієнтів на поверхні заготовки (рис. 4.14).

На кінцевому етапі, за межами зони контакту бічної частини інструменту з деталлю, деформація під поверхнею припиняється. Термомеханічний шар на поверхні охолоджується в міру віддалення від зони обробки (рис. 4.14, а і б) [114].

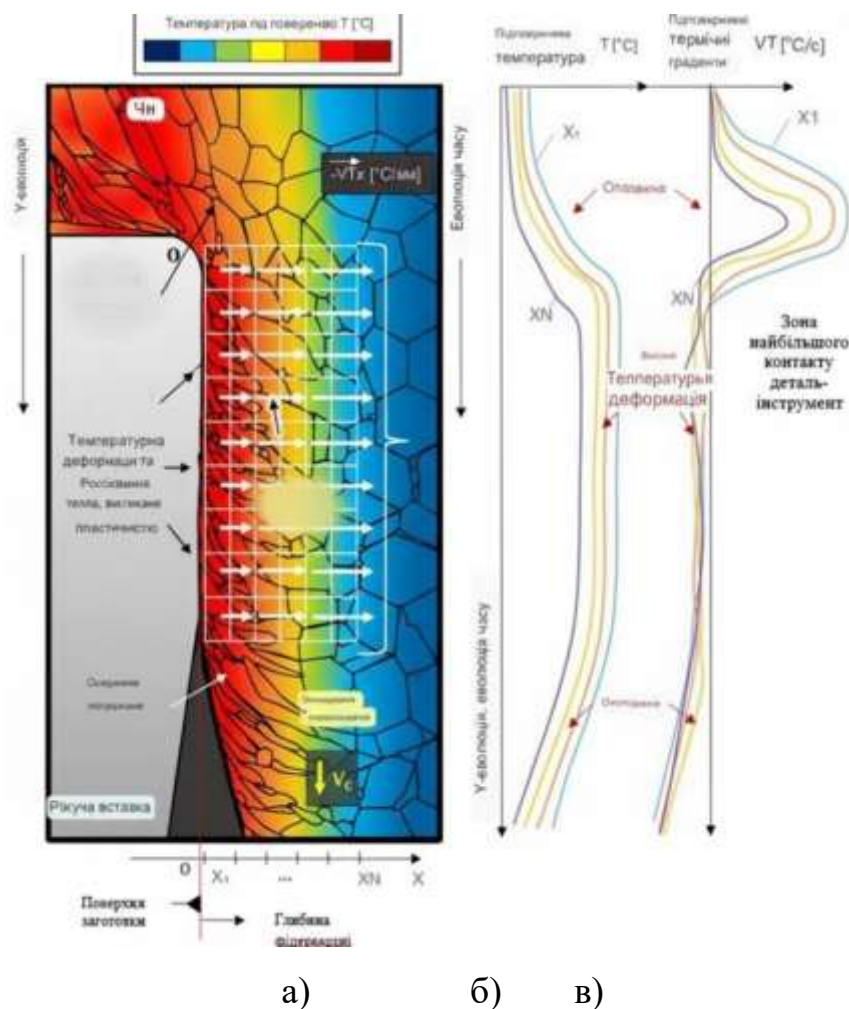


Рисунок 4.14 – Схематичне зображення еволюції теплового поля та градієнтів температури в зонах зсуву металу внаслідок фрикційної взаємодії та пластичної деформації, що розвивається на межі розділу інструмент – заготовка: а – підповерхневе теплове поле та просторові

температурні градієнти, викликані обробленою поверхнею у процесі пластичної деформації; б – зміна температури; в – температурних градієнтів у часі на різних глибинах під поверхнею, коли шари заготовки перетинають поверхню заготовки інструменту, показуючи фази нагрівання та охолодження, розділені високотемпературною зоною деформації.

Джерело: сформовано автором

Матеріал заготовки нагрівається по мірі наближення до зони удару (контакту), тоді як охолодження відбувається, коли він віддаляється від цієї зони. Отже, через безперервність теплових полів вздовж довжини контакту заготовки та бічної поверхні інструменту повинен існувати принаймні один пік температури, який розташований між фазами нагрівання та охолодження.

Крім того, найбільш суворі умови (термічні та механічні) мають виникати на невеликій глибині під поверхнею, тобто в зонах, що проходять найближче до бічної поверхні інструменту, і зменшуватися по мірі віддалення від обробленої поверхні.

У підповерхневій зоні заготовки, яка проходить поблизу межі розділу інструмент-заготовка, виникають умови швидкого навантаження-розвантаження. З механічної точки зору, матеріал зрізається з високою швидкістю, тоді як з термічного боку нижня поверхня заготовки проходить миттєвий цикл нагрівання-охолодження (рис. 4.14, б і в).

Теплові та механічні поля в третинній зоні зсуву насправді глибоко взаємопов'язані. Генерація тепла, викликана обробкою (деформацією), визначає форму теплових градієнтів, що розвиваються на поверхні заготовки. Ці градієнти, своєю чергою, можуть впливати на високотемпературну реакцію об'ємів матеріалу, що зазнають пластичної деформації [114,115].

Опис просторово-часової еволюції процесу пластичної деформації у третинній зоні зсуву може бути успішно досягнутий шляхом аналізу енергетичного балансу.

Генерація тепла, спричинена обробкою, фактично призводить до виникнення високих температурних градієнтів, які стимулюють теплопровідність у підповерхневому шарі заготовки.

Застосування рівнянь теплового балансу до контрольних об'ємів, розташованих у третинній зоні зсуву, дає змогу відобразити розподіл теплоутворення. Це, своєю чергою, дозволяє ідентифікувати стадії, що характеризують процес підповерхневої мікроструктурної деформації.

Аналіз виявив ключові відкриті питання: перше стосується просторово-часової еволюції температурних полів і градієнтів (рис. 4.4, а і в), яких зазнають підповерхневі шари заготовки при проходженні через межу розділу «заготовка-інструмент». Друге питання стосується форми цих теплових циклів (рис. 4.4, б і в), що виникають у матеріалі заготовки під впливом термофізичних граничних умов під час обробки, а також зв'язку між швидкостями нагрівання та охолодження приповерхневого шару та його мікроструктурною цілісністю.

Для відповіді на ці питання проводиться дослідження термічної історії мікроструктурної деформації поверхні за різних комбінацій механічних і теплових впливів, що створюються обраними параметрами обробки. Фактично, це дозволяє створити різні мікроструктурні стани, які вивчаються і зіставляються з тепловими умовами, за яких вони виникли під час процесу обробки [114,115].

Термічні механізми поверхневої деформації в третинній зоні зсуву були досліджені в контексті експериментів пластичної деформації, щоб забезпечити інфрачервоне вимірювання температури в зонах контакту інструмент-заготовка.

4.5. Дослідно-виробничі випробування ресурсоощадного процесу відновлення лап культиватора

При виборі конкретного промислового зразка, на якому найбільше можна було б перевірити результати проведених досліджень, було визначено основні вимоги до лапи культиватора або леміш плуга.

Марка оброблюваного матеріалу повинна відповідати вимогам до твердості при ППД. Дозволяє отримати потрібні геометричні, фізико-механічні властивості та експлуатаційні характеристики деталі. Цим вимогам найбільш повно відповідають леза культиватора, лемеші плуга, диски борін.

На рисунку 4.15 показано робочі органи ґрунтообробного культиватора, що комплектується різними формами лап.

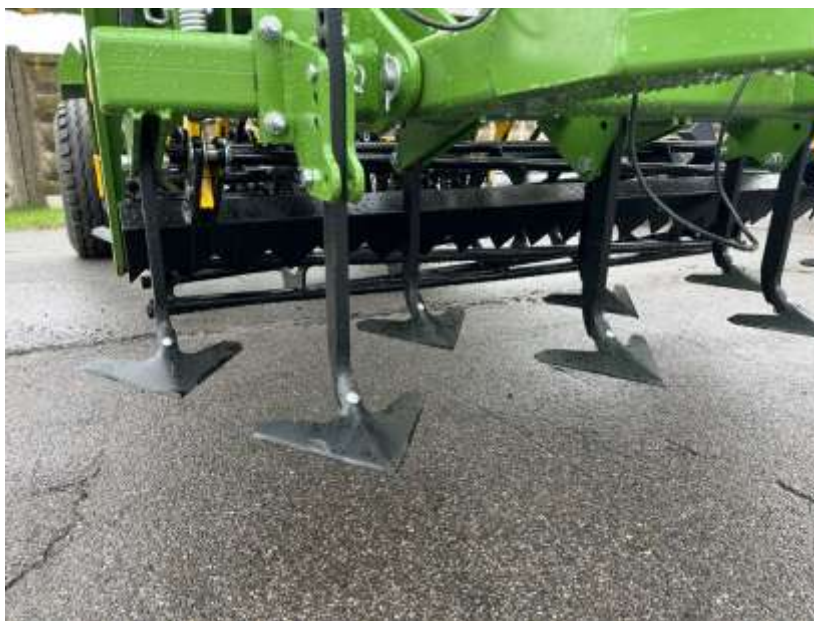


Рисунок 4.15 – Робочі органи ґрунтообробного культиватора

Джерело: сформовано автором

Досвід експлуатації культиваторів вітчизняного виробництва показав їх високу конкурентоспроможність за всіма показниками порівняно з кращими закордонними аналогами при значно нижчій ціні. Так, культиватори фірми ТОВ «Агро-Калина» користуються попитом не тільки на Україні, а й у ЄС і коштують менше 100 тис. доларів США за одну машину, що забезпечує конкурентоспроможність при їх експлуатації в різних умовах використання при відсутності інфраструктури та належних умов для відновлення.

Всього за статистичними підрахунками сільське господарство України потребує понад 15...20 тисяч одиниць ґрунтообробної техніки, яка працюють за сучасними технологіями. Сказане обумовило актуальність науково-дослідної роботи, яка була проведена Вінницьким національним аграрним університетом з

ТОВ «Агромаш-Калина» (додаток Е) та ТОВ «АБА «АСТРА» (додаток Ж) з метою підвищення довговічності напрацювання робочих органів ґрунтообробних машин.

Кінцевим результатом досліджень було створення базового ресурсоощадного процесу підвищення зносостійкості робочих поверхонь лап культиватора, який забезпечував би, по-перше, комплексну економію ресурсів (зарплати, електроенергії, матеріалу заготовки, амортизаційних відрахувань, витрат на інструмент тощо) і по-друге – поліпшення експлуатаційних показників лап культиватора (лемеша) загалом за рахунок цілеспрямованого впливу на наступні характеристики поверхні: пластична деформація, твердість та мікроструктура металу.

Наші дослідження показали, що найбільш ефективним засобом для розв'язання цього завдання є поєднання гідроімпульсного навантаження та поверхнево-пластичної деформації.

Виходячи зі сказаного, запропонований та випробуваний у виробництві ресурсоощадний процес зміцнення робочої поверхні лапи культиватора базується на поверхнево-пластичній деформації при гідроімпульсному впливі, що дозволяє зменшити габаритні розміри запропонованої установки, що дасть змогу раціонального розміщення в умовах виробничої зони.

Вивчення властивостей дослідної партії лап культиваторів показало, що твердість матеріалу при ППД підвищується на 37-46%, при цьому деформаційне зміцнення залежно від глибини відбитку ударника змінюється від $\varepsilon=2,8-0,1$, що дозволяє підвищити деформаційне зміцнення, яке за характеристикою мікротвердості сягає 25-50%. При експлуатаційних випробуваннях напрацювання робочих органів ґрунтообробних машин збільшується до 43%, що забезпечує збільшення напрацювання до відмови машини на елемент зношення робочого органу.

Поверхнево-пластична деформація робочих поверхонь ґрунтообробних машин доцільно проводити перед початком їх використання з метою забезпечення збільшення площ оброблюваних земель.

4.6. Висновки до 4 розділу

При виробничому дослідженні гідроімпульсного приводу встановленні реальні закономірності зміни робочих параметрів пресу, перевірі адекватності розроблених динамічної та математичної моделей, а також визначенні відмінності між теоретичними та експериментальними результатами.

Встановлено, що через перехідні процеси, які виникають у напірній гідролінії, система керування на основі блоку керування та електрогідравлічного клапана не може адекватно працювати в параметричному режимі при регулюванні подачі рідини. Причина цього полягає у миттєвому зниженні тиску при відкритті клапана та подальшому його відновленні за рахунок гідроаккумулятора, що призводить до невідповідності сигналів керування та фактичного положення золотника, спричиняючи «задирання» стола. При малих подачах, коли «задирання» не відбувається, частота та сила переміщення стола не відповідають імпульсному типу навантаження.

За допомогою досліджуваної системи керування можна отримати частоту ударів у діапазоні від 1 до 60 Гц з амплітудою коливань до 4 мм.

Оптимальний діапазон регулювання при максимальній подачі гідронасосом становить 20–35 Гц з амплітудою вібрацій до 2 мм, що забезпечує імпульсний тип навантаження. Ударна дія з амплітудою 2 мм та частотою 20–35 Гц забезпечує необхідний ударний вплив на поверхню деталі, що дозволяє змінити характер деформованої зони. Внаслідок ударної дії відбувається деформація кристалічної решітки металу, що зміцнює оброблювану поверхню без суттєвої зміни серцевини матеріалу.

Твердість оброблювальної поверхні збільшується до максимального значення 73%. Межа текучості для сталі 50 збільшується у 3 рази, а для високовуглецевих сталей (наприклад, сталь 65Г) — у 2,8 рази. Збільшення механічних характеристик при динамічному навантаженні узгоджується з теоретичними даними: при ударному навантаженні межа міцності матеріалу зміцненого шару може зростати до двох разів.

Температура нагрівання при ударній дії деформуючого елементу не перевищує 350°C і не призводить до зміни фізичного стану матеріалу. Отримане зміцнення переважно зумовлене механічними ефектами пластичної деформації.

Результати виробничого дослідження підтверджують технологічну придатність та ефективність пресу для формоутворення. Отримані закономірності зміни амплітуди та частоти вібрацій і подачі гідронасоса є експериментальною основою для подальшого вдосконалення динамічної та математичної моделей гідроімпульсного приводу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз експлуатації сільськогосподарської техніки підтвердив, що ключовою причиною втрати працездатності робочих органів є абразивне зношування, яке становить понад 60% від загального обсягу зношень. Це призводить до критичного зношення різальних кромek та носків деталей, збільшуючи тяговий опір агрегатів та знижуючи якість обробітку ґрунту. Проведене дослідження було спрямоване на розробку, теоретичне обґрунтування та експериментальну перевірку процесу деформаційного зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин, таких як лапи культиваторів та лемеші плугів, із застосуванням гідроімпульсного приводу.

2. Для реалізації процесу зміцнення була розроблена та обґрунтована конструктивна схема пресу з електрогідравлічним керуванням. Центральним елементом приводу є комбінований гідроімпульсний пристрій із вбудованим генератором імпульсів тиску. У ролі віброзбуджувача був обраний електрогідравлічний клапан-пульсатор УЕГ.С-200, що забезпечує легкість керування частотою завдяки програмному забезпеченню, поєднуючи це з потужністю гідравлічного приводу. Робочі параметри приводу були визначені як: максимальний робочий тиск – до 14 МПа, робочий діапазон ударної дії – 5,6 МПа при амплітуді коливань 2 мм і частоті 25-50 Гц.

3. Для забезпечення роботи гідроімпульсного пристрою розроблена умовна циклограма, що забезпечує етапи математичного моделювання і описує диференціальне рівняння руху ланок пристрою та рівняннями відповідної витрати енергоносія. Доведено рівняння, що визначає закон зміни сили ударної дії з точки зору теорії контактних пружних деформацій деталі під час її обробки в залежності від форми ударника гідроімпульсного приводу.

4. Поверхнево пластичне деформування підвищує твердість і міцність поверхні, формує сприятливі залишкові напруги, зменшує шорсткість поверхні. Для забезпечення цих параметрів була запропонована схема пресу з гідравлічним приводом для деформаційного зміцнення поверхні деталі. Основним виконавчим

органом стану є ударник гідроімпульсного приводу. При цьому для забезпечення заданого режиму найбільше підходить ударник сферичної форми («куля») діаметром 10 мм, що дозволяє створювати напружені зони без суттєвого впливу на зону деформації. Оптимальний режим для отримання чистого імпульсного типу навантаження знаходиться у межах частоти 20-35 Гц при амплітуді вібрацій до 2 мм. Залежно від діаметра вдавлювального ударника і твердості оброблюваного матеріалу оптимальне значення енергії становить 5-80 Дж, що дозволяє змінити фізичну суть деформаційного зміцнення при зміні дислокацій. Залежно від зміни діаметру кулі-ударника на сталь 10 найменше значення енергії до ступеня деформування становить 4 мм, найбільше – при діаметрі 40 мм.

5. Процес ППД при ударній дії підтвердив свою високу ефективність, що дозволяє збільшувати твердість оброблюваної поверхні до максимального значення – 73%, твердість наклепаної зони зростає у 1,6 рази, деформаційне зміцнення призводить до підвищення напрацювання робочих органів ґрунтообробних машин до 43% при експлуатаційних випробуваннях.

Результати дослідження комплексно обґрунтовують та доводять технологічну придатність і високу ефективність ресурсощадного процесу зміцнення робочих органів ґрунтообробної техніки на основі поверхнево-пластичної деформації при контрольованому гідроімпульсному впливі.

Розроблено рекомендації щодо результатів дисертаційного дослідження, які стосуються вибору обладнання, оснащення, схеми та режимів поверхнево-пластичного-деформування, технологічного середовища, варіантів застосування гідроімпульсного приводу. Процес випробувано у виробничих умовах при відновленні культиваторних лап та лемішів ґрунтообробної техніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бондарєв С. І., Котяй Б. В. Дослідження якісних та енергетичних показників роботи ґрунтообробної техніки. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2016. Т. 10. № 2. С. 19–23.
2. Борак К. В. Забезпечення рівностійкості зношування робочих органів ґрунтообробних машин. *Наукові праці ВНТУ. Машинобудування та транспорт*. 2022. № 1. С. 1–12. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/36436/650.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
3. Борак К. В. Комплексний підхід підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11. Поліський національний університет. Житомир. 2021. 380 с.
4. Денисенко М., Опальчук А. Зношування та підвищення довговічності робочих органів сільськогосподарських машин. *Вісник ТНТУ Механіка та матеріалознавство*. 2011. Спецвипуск, частина 2. С. 201–210. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/1442/2/TNTUB_2011_Wear_of_inckease_durability_and_element_tool_201.pdf
5. Chernovol M., Kropivniy V., Kuleshkov Y., Shepelenko I., Gutsul V. Systematic approach to the study of working surfaces wear of automotive and tractor equipment parts. *Problems of Tribology*. 2024. Vol. 29. № 1/111, 53–60. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-111-1-53-60>
6. Швець Л.В., Паладійчук Ю.Б., Труханська О.О. Технічний сервіс в АПК: навч. посіб. Т. 1. Вінниця: ВНАУ. 2019. 648 с.
7. Борак К. В., Халімовський С. А. Методи підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин. Тези. Синергетика, фрактали і нові технології. Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (4–5 червня 2025 р., Житомир). Житомир. Поліський національний університет. 2025. С. 48–53.

8. Борак К.В. Наукові основи досягнення ефекту самозагострювання різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин. *Сільськогосподарські машини*. 2020. № 44. С. 18–40.
9. Василенко М. О., Соколенко О. В., Матвійченко В. С., Буслаєв Д. О. Підвищення довговічності культиваторних лап ґрунтообробних машин. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2012. Вип. 42, ч. 2. С. 87–91.
10. Атаманюк В.В. Технологія конструкційних матеріалів / Атаманюк В.В. Київ: Кондор, 2006. 528 с.
11. Афтандіянц Є.Г., Зазимко О.В., Лопатько К.Г. Матеріалознавство: підручник. Київ: Вища освіта, 2012. 548 с.
12. Василенко М. О., та ін. Підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин, адаптованих до ґрунтів різних типів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2018. № 7. С. 164–172.
13. Василенко М., Буслаєв Д. Вплив режимів нанесення зміцнювального покриття на параметри точкового зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин. *Вісник аграрної науки*. 2015. № 93(7). С. 44–48.
14. Василенко М.О., та ін. Забезпечення експлуатаційної надійності робочих органів ґрунтообробних машин під час їх відновлення та інноваційні пропозиції сільгосппідприємствам. *Вісник аграрної науки*. 2013. № 3. С. 44–47.
15. Денисенко М.І., Рубльов В.І. Підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин з використанням точкового зміцнення. Збірник наукових праць *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2011. Т. 24, № 2. С. 28–35.
16. Лузан С.О., Петренко Д.М., Михєєв Ю.Р. Аналіз умов роботи та методів підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин (огляд). *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2018. № 14. С. 79-88.

17. Пугач А. М. Дослідження якісних показників роботи стрілочастих лап культиватора. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*. 2012. № 2. С. 114–117.
18. Градиський Ю.О., Ачкасов О.М. Підвищення надійності лісових машин шляхом зміцнення деталей енергетичними методами. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2016. № 178. С. 107–110.
19. Грушко О. В., Молодецька Т. І. Технологічний паспорт матеріалу для процесів поверхневого зміцнення заготовок. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*: Харків: НТУ "ХПІ". 2010. № 42. С. 113-118.
20. Дудніков А.А., Дудніков І.А., Дудник, В.В., Горбенко, О.В., Келемеш А.О. Зміцнення поверхневого шару деталей методом пластичного деформування. *Наукові нотатки*. 2017. № 60. С. 108-112.
21. Дяченко С.С., Дощечкіна І.В., Мовлян А.О., Плешаков Е.І. Матеріалознавство: підручник. Харків: ХНАДУ, 2007. 440 с.
22. Paladiichuk Y., Telyatnuk I. Application of wear-resistant coatings to increase resource of working bodies of grinding machines. *Modern engineering and innovative technologies*. 2021. № 18. Part 1. P 13-30. DOI: 10.30890/2567-5273.2021-18-01-045. URL: <https://www.moderntechno.de/index.php/meit/issue/view/meit18-01/meit18-01>
23. Paladiichuk Yu., Melnyk Yu. Restoration of the resource of working bodies of tillage machines by applying wear-resistant coatings. *Machinery and Energetics*. 2021. Vol. 12. № 4. P. 43-52. URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Tekhnica/article/view/15892/14243>
24. Паладійчук Ю.Б., Телятник І.А. Типи і конструкції віброзбуджувачів сучасного машинобудування. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 4 (107). С. 26-35. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-4-4. URL: <http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/December2022/RCPdoCAOCaLam9zAYAZG.pdf>
25. Іскович-Лотоцький Р. Д., Обертюх Р. Р., Архипчук М. Р. Генератори імпульсів тиску для керування гідроімпульсними приводами вібраційних та

віброударних технологічних машин: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2008. 171 с.

26. Paladiychuk Y., Telyatnik I. Increasing the efficiency of choosing a hydraulic impulse drive with programmable control. *Agricultural engineering*. 2023. Vol. 55. P. 30-43. <https://doi.org/10.15544/ageng.2023.55.4>

27. Паніна В.В., Дідур В.В., Сірий І.С., Чорна Т.С. Зміцнення деталей за допомогою поверхнево-пластичної деформації. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2020. Вип. 10. Т. 2. С. 148–155. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvtdau_2020_10_2_15

28. Кобець А. С., Пугач А. М. Вплив елементів локального зміцнення на якісні показники роботи стрілочастих лап. *Сільськогосподарські машини: Збірник наукових статей*. Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ. 2011. Вип. 21, Том І. С. 173–178.

29. Кобець А. С., Пугач А. М. Методи і способи підвищення зносостійкості робочих органів культиватора. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету: науково-теоретичний, науково-практичний журнал*. 2010. № 1. С. 61–63.

30. Кобець А.С., Пугач А.М. Методи і способи підвищення зносостійкості робочих органів культиваторів. *Вісник Дніпровського державного аграрного університету*. 2010. №1. С. 61–63.

31. Ковалевський С.В., Гущин О.В., Попов А.О. Дослідження поверхневого зміцнення робочих поверхонь деталей машин на основі поверхнево-пластичної деформації при накочуванні роликом з круговим профілем. *Обробіток матеріалів тиском*. 2016. № 2. С. 98–101.

32. D. I. Zolotarevskaya. Mathematical simulation and calculation of the soil compaction under dynamic loads. *Eurasian Soil Science*. 2011. № 44 (4). P. 407-416.

33. Василенко М.О., Буслаєв Д. О. Математичні моделі прогнозування вагового і лінійного зношень від ресурсних показників серійних і зміцнених комбінованим методом культиваторних лап. *Journal of Rural Production Research*. 2020. № 11(2). С. 29-33. URL: <https://technicalscience.com.ua/uk/author/d-o-buslayev>

34. Бадьора Н.П., Петрусь В.В., Коц І.В. Експериментальне дослідження просочувального агрегату з гідроімпульсним приводом. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету Серія: Вібрації в техніці та технологіях*. 2011. № 2(62). С. 61-65.
35. Спосіб ультразвукової зміцнюючої обробки: пат. 70985 Україна: МПК В24В 39/00. № у 2012 00461; заявл. 16.01.2012; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.
36. Спосіб обробки отворів деталей пластичним деформуванням: пат. 89284 Україна: МПК В24В 39/02. № у 2013 14312; заявл. 09.12.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7.
37. Спосіб визначення ефективності функціонування гідроімпульсного приводу тривалої дії: пат. 88882 Україна: МПК G01М 13/00. № у 2013 09935; заявл. 09.08.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7.
38. Коц І.В., Бадьора Н.П., Берник І.М. Математичне моделювання робочого процесу гідроімпульсного привода просочувального агрегату. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету Серія: Технічні науки*. 2011. № 6. С. 10-13
39. Кузін О.А. Металознавство та термічна обробка металів / Кузін О.А., Яцюк Р.А. Львів: Афіша, 2002. 304 с.
40. Клименко В.М., Турич В.В., Руткевич В.С. Практикум з матеріалознавства: навч. посіб. Вінниця, 2012. 66 с.
41. Gaponova O.P., Tarelnyk V.B., Vlasovets V.M. The Surfaces Properties of Steel Parts with Wear-Resistant Coatings of the 1M and 90% BK6 + 10% 1M Composition Applied by the Method of Electrospark Alloying with the Use of Special Technological Environments. Pt. 1. The Strengthened-Surfaces' Structural State Features. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2023. Vol. 45 № 5. P. 663-686.
42. Іскович-Лотоцький З. Д., Зелінська О. В., Іванчук Я. В. Технологія моделювання оцінки параметрів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2018. 153 с

43. Іскович-Лотоцький Р. Д., Іванчук Я. В. Підвищення ефективності розвантаження матеріалів під дією періодичних ударних імпульсів. *Вібрації в техніці і технологіях*. 2008. № 2 (51). С. 8-11.
44. Іскович-Лотоцький Р. Д., Іванчук Я. В., Веселовський Я. П. Основи резонансно-структурної теорії віброударного розвантаження транспортних засобів. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна*. 2014. № 5 (53). С. 109-118.
45. Іскович-Лотоцький Р. Д., Іванчук Я. В., Дослідження динаміки процесу роботи універсального гідравлічного віброударного приводу для розвантаження транспортних засобів. *Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»)*. 2007. № 20. С. 184-187.
46. C. Debeleac, S. Nastac. Stochastic Approaches of Nonlinear Model-Based Simulations for Vibratory Compaction Process. *PAMM*. 2014. vol. 14 (1). P. 749-750.
47. Матвійчук В. А., Михалевич В. М., Краєвський В.О. Пристрій для давильних робіт. Патент України №20031213282. Заявлено 31.12.2003. Опубл. 15.10.2004. Бюл. №10. 2 с.
48. Обертюх Р. Р., Слабкий А. В. Пристрої для вібраційного різання та деформаційного зміцнення з пружними елементами високої жорсткості. *Матеріали (тези) XVI Міжнародної науково-технічної конференції «Вібрації в техніці та технологіях»*. Вінниця. 2017. С. 68–71.
49. Обертюх Р. Р., Слабкий А. В., Андрухов С. Р., Кудраш В. О. Параметричні однокаскадні генератори імпульсів тиску підвищеної пропускної здатності. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2019. № 1. С. 40–48.
50. Телятник І.А. Дослідження поверхневої пластичної деформації при гідроімпульсному впливі. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 1 (120). С.110-119. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-1-13 URL: <http://tetapk.vsau.org/storage/articles/May2023/HCh4gxVEZLwkRrnU0kkr.pdf>
51. Обертюх Р. Р., Слабкий А. В., Марущак М. В. Віброударний пристрій з гідроімпульсним приводом підвищеної швидкодії та ефективності для

деформаційного зміцнення поверхонь деталей машин. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2017. № 1. С. 63–71.

52. Обертюх Р. Р., Слабкий А. В., Марущак М. В. Гідроімпульсний віброударний пристрій для деформаційного зміцнення деталей : пат. № 103682 Україна, МПК V24B 39/04. Зареєстровано 24.06.2015, опубл. 25.12.2015, Бюл. № 24.

53. Матвійчук В.А., Гайдамак О.Л., Колісник М.А. Підвищення службових характеристик поверхневого шару деталей шляхом застосування поверхневого пластичного деформування і холодного газодинамічного напилення. *Віб्राції в техніці та технологіях*. 2020. № 2 (97). С. 90-100.

54. Паладійчук Ю.Б., Телятник І.А. Алгоритм експериментального дослідження гідроімпульсного пристрою для зміцнення деталей деформацією. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 4 (123). С. 31-42. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-4-4 URL: [http://tetapk.vsau.org/storage/articles/January 2024/Go0f2ciQxjm4yh6q73Nk.pdf](http://tetapk.vsau.org/storage/articles/January%2024/Go0f2ciQxjm4yh6q73Nk.pdf)

55. Матвійчук В.А., Колісник М.А., Штуць А.А. Побудова кривих граничних деформацій матеріалів. *Віб्राції в техніці та технологіях*. № 2 (105) 2022. С 84-90.

56. Нахайчук О. В. та ін. Нові технологічні процеси з використанням прогресивних методів пластичного деформування : монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця. 2008. 158 с.

57. Обертюх Р. Р., Слабкий А.В. Пристрої для віброточіння на базі гідроімпульсного привода : монографія. Вінниця: ВНТУ, 2015. 164 с.

58. Обертюх Р. Р., Слабкий А.В., Чернійко В.В. Динамічна та математична моделі гідроімпульсного пристрою для деформаційного зміцнення деталей з вбудованим генератором імпульсів тиску. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: український міжвідомчий науково-технічний збірник*. Львів. 2014. Вип. 48. С. 11–24.

59. Обертюх Р.Р., Слабкий А.В., Марущак М.В. Віброударні гідроімпульсні пристрої підвищеної швидкодії для динамічного деформаційного

зміцнення поверхонь деталей машин з вбудованим генератором імпульсів тиску *Наукові нотатки*. Луцьк. 2017. Вип. 59. С. 204 – 211.

60. Posviatenko E., Posviatenko N., Budyak R., Shvets L., Paladiichuk Y., Aksom P., Rybak I., Sabadach B., Hryhorychen V. Influence of a material the technological factors on improvement of operating properties of machine parts by reliefs and film coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5. № 12 (95). P. 48-56.

61. Веселовська Н. Р., Зелінська О. В., Іванчук Я. В. Загальні принципи побудови і дослідження детермінованих моделей вібраційних та віброударних машин з гідроімпульсним приводом. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2018. № 4(91). С. 21-28.

62. Веселовська Н.Р., Шаргородський С.А., Бурлака С.А. Математичне моделювання взаємодії стрілчастої лапи культиватора з ґрунтом. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 1 (108). С. 57-62.

63. Матеріалознавство і слюсарна справа: навч. посіб: за ред. Федірко П.П. Кам'янець-Подільський: ПП «Медобори». 2006. 384 с.

64. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів / Ясюк В. Ф. та ін. Київ, 2005. 528 с.

65. Grushko O. V. Development of Usage of Brinell Hardness Test Method for Flow Stress Definition during Cold Deformation. *Metallurgical and Mining Industry*. 2013. Vol. 5, № 1. p. 11-16.

66. Matvijchuk V., Shtuts A., Kolisnyk M., Kupchuk I., Derevenko I. Investigation of the Tubular and Cylindrical Billets Stamping by Rolling Process with the Use of Computer Simulation. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2022. № 66(1). P. 51–58 <https://doi.org/10.3311/PPme.18659>

67. Mikhalevich V. M., Abramchuk I. V. Maximum Accumulated Strain for Linear Two-Link Triangle-Like Deformation Trajectories. *International Applied Mechanics*. 2021. №. 57(6). p. 720–736.

68. Гідравлічний клапан-пульсатор з електромагнітним керуванням: [пат. 81612 Україна: № u201214111; заявл. 11.12.2012; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 13.](#)

69. Гідроімпульсний віброударний пристрій для деформаційного зміцнення деталей: пат. № 103682 Україна: МПК В24В 39/04. № у 2015 06247; заявл. 24.06.2015; опуб. 25.12.2015, Бюл. №24.

70. Гідроімпульсний пристрій для вібросвердління: пат. 117393 Україна: В23В 47/18. № у 201700119; заявл. 03.01.2017; опубл. 26.06.2017; Бюл. № 12/2017.

71. Пристрій для вимірювання параметрів ультразвукових коливань: пат. 101967 Україна: МПК G01Н 1/08. № у 2015 03354; заявл. 10.04.2015; опубл. 12.10.2015, Бюл. № 19.

72. Пристрій для вібросвердління: [пат. 69738 Україна: МПКВ23В 47/00. № у201112869; заявл. 02.11.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9.](#)

73. Зелінська О.В. Дослідження основних робочих режимів інерційного вібропрес-молота з гідроімпульсним приводом. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. № 2(85). С. 43-46.

74. Клапан-пульсатор: [пат. 90249 Україна: МПК F01L 1/00. № у201303887; заявл. 29.03.2013; опубл. 26.05.2014, Бюл. № 10.](#)

75. Mikhalevich V. M., Dobranuk Y. V., Kraevsky V. A, Mikhalevich O. V. Dependence of plastic ultimate strain from a friction at end faces at axisymmetric compression. *Bulet. Inst. Politehnic Din Iasi. Tomul LIV(LVIII)*, Fasc. 3 - 4. 2008. p. 49 - 53.

76. Veselovska N., Sivak R., Paladiychuk Y., Bandura V., Telyatnik I., Bohatiuk M., Savkiv V., Edl M. Kinematic characteristics of deformed porous structures. *Journal of Engineering Sciences*. 2024. Vol. 11. № 1. P. 44–53. [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).d6](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).d6)

77. Puzyr R., Shvets L. Development of methods of experimental and analytical research of metal flow in the center of deformation of aluminum alloys during combine parts rolling. *Norwegian Journal of development of the International Science*. №83. 2022. P. 63-74.

78. Gaponova O.P., Tarelnyk V.B., Vlasovets V.M. Improvement of Quality Parameters of Surface Layers of Steel Parts after Aluminizing by Electrosark

Alloying. Pt. 1. Features of the Structural State of Steel Surfaces after Aluminizing. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2023. Vol.45 (12). P. 1449-1472. DOI: 10.15407/mfint.45.12.1449 URL: <https://mfint.imp.kiev.ua/en/abstract/v45/i12/1449.html>

79. Шаргородський С.А., Руткевич В.С., Ящук Є.В. Математичне моделювання гідропривода переведення широкозахватного сільськогосподарського агрегату із транспортного положення у робоче. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 3 (106). С. 54-63. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-3-8 URL: <http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/December2022/j1NBOscAM0GaZPLgIX10.pdf>

80. Vlasovets V., Vlasenko T., Kovalyshyn S., Kovalyshyn O., Kovalyshyn O., Kurpaska S., Kielbasa P., Bilovod O., Shulga L. Effect of various factors on the measurement error of structural components of machine parts materials microhardness using computer vision methods. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 99. №1. P. 323-329. DOI: 10.15199/48.2023.01.67 URL: <https://archiwum.pe.org.pl/articles/2023/1/67.pdf>

81. Іванкова О. В., Бартош В. Ю., Общій Я. О., Кисіль Ю. Ю. Відновлення зношених деталей сільськогосподарської техніки пластичним деформуванням. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. 2023. Вип. 25 (1). С. 23–29.

82. Іванчук Я.В., Іскович-Лотоцький Р.Д., Севостьянов І.В., Веселовська Н.Р., Коваль К.О., Белзецький Р.С., Добровольська К.В., Куша Я.Ю., Воловик Б.П. Математичне моделювання робочих процесів в керуючій апаратурі гідроімпульсного привода. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2021. № 5 (2). С. 47-56.

83. Іскович-Лотоцький Р. Д., Обертюх Р.Р., Севостьянов І.В. Процеси та машини вібраційних і віброударних технологій: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2006. 291 с.

84. Міськов В. П. Інерційний вібропрес-молот з електрогідравлічною системою керування гідроімпульсного привода для формоутворення заготовок з

порошкових матеріалів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.03.05 / Міськов Вадим Петрович – Вінниця, 2015. – 22 с.

85. Мороз С.А., Приступа С.О., Дужич Б.С. Аналіз формування напруженого стану поверхневого шару деталей на фінішних операціях. *Перспективні технології та прилади*. 2016. № 9. С. 106-111.

86. Ogorodnikov V., Derevenko I., Sivak R. On the Influence of Curvature of the Trajectories of Deformation of a Volume of the Material by Pressing on Its Plasticity Under the Conditions of Complex Loading, *Materials Science*, Volume 54, Issue 3, P. 326–332, November. 2018.

87. Paladiichuk Y. Study of characteristics of growth formation after deformation strength during deforming strength. *Colloquium-journal*. 2021. Czesc 1. № 2 (89). P. 30-35. DOI: 10. 24412/2520-2480-2021-289-30-36. URL: <https://colloquium-journal.org/wp-content/uploads/2022/05/Colloquium-journal-2021-89-1.pdf>

88. Іскович-Лотоцький Р.Д., Булига Ю.В., Манжілевський О.Д. Стенд з гідроімпульсним приводом для моделювання просторового вібронавантаження. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету Серія: Вібрації в техніці та технологіях*. 2010. № 4. С. 13-16.

89. Іскович-Лотоцький Р.Д., Зелінська О. В., Веселовська Н.Р. Підвищення ефективності функціонування вібропреса з гідроімпульсним приводом. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2015. № 2 (78). С. 75-79.

90. Кузін О.А., Яцюк Р.А. Металознавство та термічна обробка металів: підручник. Львів: Афіша, 2002. 304 с.

91. Опальчук А.С., Котречко О.О., Роговський Л.Л. Лабораторний практикум з технології конструкційних матеріалів і матеріалознавства: навч. посібник / За ред. А.С. Опальчука. Київ: Вища освіта, 2006. –288 с.

92. Sivak R. Evaluation of metal plasticity and research on the mechanics of pressure treatment processes under complex loading. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2017. №6-7. P. 34-41.

93. Веселовська Н.Р., Паладійчук Ю.Б., Телятник І.А. Дослідження мікротвердості поверхні циліндричної деталі при деформаційному протягуванні. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 3 (118). С. 31-42. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-3-5 URL: <http://tetapk.vsau.org/storage/articles/December2022/STrrbMph4smnjOzjL0Wk.pdf>
94. Матеріалознавство: підруч. / Кіндрачук М.В., Лабунець В.Ф., Климова Т.С., Черниш І.Г. Київ: НАУ, 2012. 492 с.
95. Paladiychuk Y., Telyatnik I., Kubai M. Research of the vibratory formation of the compassion of powder materials by hydro-impulse loading. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 3 (122). С. 35–42. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-3-4 URL: <http://tetapk.vsau.org/storage/articles/December2023/YyB8gjAl8TX8IwbnreIU.pdf>
96. Paladiychuk Y., Telyatnik I., Kubai M. Metallographic study of changes in the structure of a deformed metal layer during water-pulse smoothing. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2024. № 4 (127). С. 35–42. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-4-1 URL: <http://tetapk.vsau.org/storage/articles/December2024/o77xpIp9UfjoNC0EaHOu.pdf>
97. Nemyrovskiy Y. B., Shepelenko I. V., Otamanskyi V. V., Melnyk O. L., Vasylyv T. I. Plasticity of workpieces processed by deforming broaching with through deformations. *Journal of Engineering Sciences*. 2025. Vol. 12(2). P. 9–24. [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(2\).d2](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(2).d2)
98. Штуць А., Янович В., Яропуд В. Розширення технологічних можливостей штампування обкочуванням шляхом індукційного поверхневого нагріву скраднопрофільних заготовок. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2025. Т. 349. № 2. С. 13-22. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-349-1 URL: <https://heraldts.khmnpu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/1563/1561>
99. Металознавство: підручник / Бялік О.М., Черненко В.С. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2002. 384 с.

100. Михалевич В. М., Краєвський В. О., Добранюк Ю. В. Моделювання граничних пластичних деформацій при нестационарних процесах та задачі оптимізації. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск : Нові рішення в сучасних технологіях.* Харків : НТУ "ХПІ". 2009. № 31. С. 64-70.

101. Thomason P.F. The use of pure aluminum as an analogue for the history of plastic flow. Studies of ductile fracture criteria in steel compression specimens. *Int J Mech Sci.* Vol. 5 (10). 1968. P. 1-18.

102. Vedmitskyi, Y.G., Kukharchuk, V.V., Hraniak, V.F. New nonsystem physical quantities for vibration monitoring of transient processes at hydropower facilities, integral vibratory accelerations. *Przegląd Elektrotechniczny.* 2017. Vol. 93. № 3. P. 69-72.

103. Veselovska N., Shargorodskyi S., Rutkevych V., Kupchuk I., Burlaka S. Development of the mathematical model of the hydraulic drive of the lift mechanism of the working equipment of the front loader. *Przegląd Elektrotechniczny.* 2023. Вип. 99, № 10. С. 34-38. DOI: 10.15199/48.2023.10.06 URL: <https://archiwum.pe.org.pl/articles/2023/10/6.pdf>

104. Михалевич В.М. Матвійчук В.А. Колісник М.А. Оцінка деформовності матеріалу заготовок при прямому видавлюванні методом штампування обкочуванням. *Обробка матеріалів тиском.* 2022. № 1 (51). С. 87-97.

105. Mykhalevych V., Dobraniuk Y., Matviichuk V., Kraievskyi V., Tiutiunnyk O., Smailova S., Kozbakova A. A comparative study of various models of equivalent plastic strain to fracture. *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska.* № 13. 2023. P. 64-70.

106. Nemyrovskyi, Y., Otamanskyi, V., Melnik, O. L., Shepelenko, I., Posviatenko, N. Improving the technology for restoring worn parts based on cold plastic deformation. *Problems of Tribology.* 2024. Vol. 29 № 3/113, 31–42. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-113-3-31-42>

107. Пахолюк А.П. Основы материаловедства і конструкційні матеріали: посібник / Пахолюк А.П., О.А. Пахолюк О.А. Львів: Світ, 2005. 172 с.

108. Попович В.В. Технології конструкційних матеріалів і матеріалознавство: навчальний посібник / Попович В.В., Голубець В.М. Суми: Університетська книга, 2012. Книга II. 260 с.
109. Технологія конструкційних матеріалів: Підручник / Сологуб М.А., Рожнецький І.О., О. І. Некоз О.І. та ін.; За ред. Сологуба М.А. 2-ге вид., перероб. і допов. Київ: Вища школа, 2002. 374 с.
110. Тітов А. В., Тітов О. В., Шмельова Л. В., Лавріненко А. Д. Математична модель взаємодії сферичного індентора з поверхнею деталі. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2011. № 62. С. 95-99.
111. Роговський Л.Л., Роговський І.Л.. Теорія різання, верстати, інструмент. частина 2. Київ: НАУ, 2010. 24 с.
112. Попович В.В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: підручник / Попович В.В. Львів: Світ, 2006. 624 с.
113. Сердюк О. В., Сивак І. О., Сухоруков С. І., Сивак Р. І. Оцінка пластичності поверхневого шару металу при немонотонному навантаженні. *Наукові нотатки: міжвузівський збірник*. 2016. № 54. С. 277-281.
114. Сивак Р.І. Накопичення пошкоджень при імпульсному пластичному деформуванні поверхневого шару. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. № 2. С. 47-50.
115. Паладійчук Ю.Б., Телятник І.А. Дослідження теплового циклу на поверхні заготовки внаслідок пластичної деформації при механічній обробці. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 2 (109). С. 72-84. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-2-9 URL: <http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/October2023/6ugL0vI2uU2b9pE2Whdx.pdf>
116. Черновол М.І., Пермяков О.А., Немировський Я.Б., Шепеленко І.В., Горбулик В.І. Методологія технологічного проектування процесу відновлення деталей. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні*. 2023. № 2 (8) 2023. С. 10–16. DOI: 10.20998/2079-004X.2023.2(8).02 URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/70482>

ДОДАТКИ

Додаток А

Хімічний склад якісної вуглецевої конструкційної сталі

Марка сталі	C, %	Mn, %	Si, %	Cr, %
08пс	0,05 - 0,11	0,35 - 0,65	0,05 - 0,17	0,10
10пс	0,07 - 0,14	0,35 - 0,65	0,05 - 0,17	0,15
15	0,12 - 0,19	0,35 - 0,65	0,17 - 0,37	0,25
20	0,17 - 0,24	0,35 - 0,65	0,17 - 0,37	0,25
30	0,27 - 0,35	0,50 - 0,80	0,17 - 0,37	0,25
40	0,37 - 0,45	0,50 - 0,80	0,17 - 0,37	0,25
45	0,42 - 0,50	0,50 - 0,80	0,17 - 0,37	0,25
55	0,52 - 0,60	0,50 - 0,80	0,17 - 0,37	0,25
60	0,57 - 0,65	0,50 - 0,80	0,17 - 0,37	0,25
65	0,62 - 0,70	0,50 - 0,80	0,17 - 0,37	0,25
70	0,67 - 0,75	0,50 - 0,80	0,17 - 0,37	0,25
75	0,72 - 0,80	0,50 - 0,80	0,17 - 0,37	0,25
80	0,77 - 0,85	0,50 - 0,80	0,17 - 0,37	0,25
85	0,82 - 0,90	0,50 - 0,80	0,17 - 0,37	0,25
60Г	0,57 - 0,65	0,70 - 1,00	0,17 - 0,37	0,25
65Г	0,62 - 0,70	0,90 - 1,20	0,17 - 0,37	0,25
70Г	0,67 - 0,75	0,90 - 1,20	0,17 - 0,37	0,25

Додаток Б

Механічні характеристики якісної конструкційної сталі

Марка сталі	Межа міцності σ_B , МПа	Відносне видовження δ , %	Відносне звуження ψ , %	Твердість НВ, МПа (без термічної обробки)
08пс	330	33	60	1310
10пс	340	31	55	1430
15	380	27	55	1490
20	420	25	55	1630
30	500	21	50	1790
40	580	19	45	2170
45	610	16	40	2290
55	660	13	35	2550
60	690	12	35	2550
65	710	10	30	2550
70	730	9	30	2690
75	1100	7	30	2850
80	1100	6	30	2850
85	1150	6	30	3020
60Г	710	11	35	2690
65Г	750	9	-	2850
70Г	800	8	-	2850

Додаток В

Підсилювач електрогідравлічний УЕГ.С



Підсилювач електрогідравлічний УЕГ.С призначений для управління гідравлічними виконавчими механізмами пропорційно електричному вхідному сигналу.

Технічні характеристики:

Межі зміни вхідного електричного безперервного токового сигналу постійного струму: мінус 100 - 0 - плюс 100 мА.

Опір вхідного ланцюга: 60 ± 10 Ом

Індуктивність вхідного ланцюга: не

більше 2Гн

Ефективне значення струму осциляції (змінна складова частотою 250 ± 50 Гц, накладена на вхідний сигнал): від 5 до 8мА.

Тиск харчування: 1,6-32 МПа.

Робоче середовище: мінеральні масла.

Робочий діапазон температур масла: від $+20$ до $+70$ °С

Витрата масла (при перепаді тиску на підсилювачі 10 МПа і максимальному вхідному сигналі): УЕГ.С-10 - 10 ± 1 л / хв; УЕГ.С-16 - $16 \pm 1,6$ л / хв; УЕГ.С-25 - $25 \pm 2,5$ л / хв; УЕГ.С-40 - 40 ± 4 л / хв; УЕГ.С- 63 - $63 \pm 6,3$ л / хв; УЕГ.С-100 - 100 ± 10 л / хв; УЕГ.С-200 - 200 ± 20 л / хв; УЕГ.С-500 - 500 ± 50 л / хв.

Зона нечутливості при тиску живлення 32 МПа від діапазону зміни вхідного сигналу, не більше: 0,4%.

Частота відповідна фазового зсуву 90° (при вхідному сигналі 20% від максимального), не менше:

УЕГ.С-10; УЕГ.С-16; УЕГ.С-25 і УЕГ.С-40 - 220 Гц; УЕГ.С-63. і УЕГ.С-100 - 120 Гц; УЕГ.С-200 - 70 Гц; УЕГ.С-500 - 27 Гц.

Середнє напрацювання на відмову T_0 з урахуванням технічного обслуговування, що регламентується інструкцією по експлуатації: 66700 год.

Повний середній термін служби (при середньорічній напрацювання 2600 год. і перепаді тисків на підсилювачі 10 МПа): не менше 8 років.

Маса, не більше: УЕГ.С-10; УЕГ.С-16; УЕГ.С-25 і УЕГ.С-40 - 2,1 кг; УЕГ.С-63 і УЕГ.С-100 - 2,7 кг; УЕГ.С-200 - 3,8 кг; УЕГ.С-500 - 7,8 кг.

Габаритні розміри: УЕГ.С-10; УЕГ.С-16; УЕГ.С-25 і УЕГ.С-40 101x117x122 мм; УЕГ.С-63 і УЕГ.С-100 - 115x121x 35 мм; УЕГ.С-200 138x125x142 мм; УЕГ.С-500 - 180x151x162 мм.

Додаток Г

Тарувальний стенд НТЦ-11.38

Навчальний лабораторний стенд призначений вимірювання тиску та витрати рідини, а також визначення режиму перебігу. Виконується побудова напірних та п'єзометричних ліній у трубопроводах, вивчається рівняння Бернуллі та розраховуються коефіцієнти гідравлічних опорів, включаючи коефіцієнт Дарсі. Також досліджується нестационарне закінчення рідини через гідродросель, а також характеристики різних гідравлічних пристроїв: шестеренного насоса, аксіально-поршневого гідромотора, гідроциліндра та регульованих гідроприводів з поступальним та обертальним рухом. Стенд є об'єднаною версією навчальних лабораторних стендів НТЦ-11.17 та НТЦ-11.36.



Рисунок 1. Тарувальний стенд НТЦ-11.38

Технічні характеристики	
Живлення	3-50 Гц 380В
Споживча потужність, кВт, не більше	3.7
Вага стенда, кг, не більше	220

Додаток Д



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, тел. (0432) 46-00-03,
email: office@vsau.org, rector@vsau.org, код ЄДРПОУ 00497236

10 грудня 2025 р. № Д1.1-60-1590
на № _____ від _____

ДОВІДКА

про впровадження результатів наукових досліджень
дисертаційної роботи Телятник Інни Анатоліївни
на тему: «Дослідження деформаційного зміцнення робочих поверхонь
грунтообробних машин гідроімпульсним навантаженням»

Повідомляємо, що наукові розробки Телятник Інни Анатоліївни за вказаною темою дисертації мають практичну цінність, що зумовлено їх впровадженням у навчально-методичний процес та наукову роботу кафедри агроінженерії та технічного сервісу.

Положення дисертаційної роботи використовується при викладанні навчальних дисциплін «Надійність і ремонт машин», «Трактори і автомобілі», «Сільськогосподарські машини».

Довідка видана Телятник І.А. для представлення у спеціалізовану вчену раду за місцем захисту її дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Розглянуто та затверджено на засіданні науково-методичної комісії Вінницького національного аграрного університету від 30 жовтня 2025 року, протокол № 5.

В.о. ректора



Віктор МАЗУР

№ 02140

Додаток Е

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. ректора Вінницького національного
аграрного університетуВіктор МАЗУР
« 19 » листопада 2025 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Агромаш-Калина»

Юрій БЕЗУГЛИЙ
« 19 » листопада 2025 р.

А К Т

про впровадження/використання результатів
науково-технічної роботи

Даним актом стверджується, що результати науково-технічної роботи, які отримані здобувачем третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти ОНП «Матеріалознавство» Телятник Інною Анатоліївною під керівництвом кандидата технічних наук, доцента, доцента агроінженерії та технічного сервісу, інженерно-технологічного факультету, Вінницького національного аграрного університету, Паладійчука Юрія Богдановича впроваджені та використані на виробництві ТОВ «Агромаш-Калина» (ЄДРПОУ 32320510, Вінницька область, Хмельницький район, місто Калинівка, вул. Незалежності, 46). ТОВ «Агромаш-Калина» в особі директора Безуглого Юрія Миколайовича отримало дослідний зразок і конструкторську документацію пресу з гідроімпульсним приводом, яка розроблена в межах виконання дисертаційної роботи «Дослідження деформаційного зміцнення робочих поверхонь ґрунтообробних машин гідроімпульсним навантаженням» Телятник І.А., Паладійчука ЮБ.

Підприємство ТОВ «Агромаш-Калина» зацікавлене у виготовленні дослідних зразків гідроімпульсного приводу ударного типу для зміцнення робочих поверхонь виконавчих органів ґрунтообробних сільськогосподарських машин у кількості 2 штук для виробничих випробувань і серійного виробництва.

Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансово-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються двосторонніми договорами.

Від ВНАУ

к.т.н., агроінженерії та технічного
сервісу інженерно-технологічного
факультету ВНАУ

Юрій ПАЛАДІЙЧУК

Здобувач третього освітньо-наукового
рівня вищої освіти ОНП
«Матеріалознавство»

Інна ТЕЛЯТНИК

« 19 » листопада 2025 р.

Від ТОВ «Агромаш-Калина»

директор

Юрій БЕЗУГЛИЙ

« 19 » листопада 2025 р.

Додаток Ж

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. ректора Вінницького
національного аграрного
університету
Доктор МАЗУР
« 10 » листопада 2025 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор з розвитку ТОВ «АБА
«АСТРА»

Олександр САВУНІН
« 10 » листопада 2025 р.

А К Т
про виробничу перевірку

Ми, що нижче підписалися, представники Вінницького національного аграрного університету, здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Матеріалознавство» Телятник Інна Анатоліївна під керівництвом к.т.н., доцента кафедри агроінженерії та технічного сервісу інженерно-технологічного факультету ВНАУ Паладійчук Юрія Богдановича, з однієї сторони, і представник ТОВ «АБА «АСТРА» (ЄДРПОУ 30050930, Хмельницьке шосе, 3км, Якушинці, Вінницька область, 23222) директор з розвитку Савунін Олександр Сергійович, з другої сторони, склали цей акт про те, що розроблений Телятник І.А. прес з гідроімпульсним приводом пройшов виробничу перевірку на базі ТОВ «АБА «АСТРА».

Дослідження проводили до проектної документації та технічних умов, затверджених у ході науково-дослідних робіт. Конструктивні параметри експериментального зразка наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Конструктивні та технічні параметри дослідного зразка пресу з електрогідравлічним керуванням.

Конструктивні параметри		Одиниця вимірювання	Значення
Назва	Позначення		
Об'єм гідробака	V_0	дм ³	28
Маса установки	m_0	кг	300
Радіус деформаційного ударника	r	мм	10
Висота установки	H_0	мм	1120
Потужність масляного насоса	$P_{м.н.}$	МПа	30
Амплітуда вібрацій	A	мм	2
Частота ударів	ω	с ⁻¹	20
Робочий діапазон гідроімпульсу	T_0	МПа	5,6
Тиск спрацювання ударника (мінімальний)	P_0	МПа	12,5
Подача гідронасоса	Q_0	м ³ /с	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Потужність електродвигуна гідросистеми	N	кВт	3,3

Здійснено аналіз основних параметрів роботи вібраційного пресу, що включає визначення частоти дії ударника, ступінь зміцнення металу, елементарних площадок зміцнення робочої кромки лапи культиватора, ступінь зміцнення (підвищення твердості).

При випробуваннях встановлено, що ступінь деформаційного зміцнення в поверхневих шарах металу становить $\epsilon = 2,8$, а при заглибленні ударника в матеріал ступінь деформаційного зміцнення досягає величини $\epsilon = 0,2$, що дозволяє зберегти пружність металу деталі. Енергія удару складає 80 Дж. При поверхнево-пластичній деформації твердість металу збільшується до 440 НВ.

Можемо зробити висновки, що ефективна робота гідроімпульсного пресу досягається за умов створення гідротиску в ударному механізмі $P = 6,5$ МПа, діаметр ударника радіальної форми 10 мм, амплітуда удару 20 Гц, підвищення твердості робочої поверхні, робочого органу ґрунтообробної машини 400-460 НВ.

Високі показники ефективності, покращена якість зміцнення деталі, дозволяє підвищити ресурс робочих елементів ґрунтообробної техніки на 43%, що дозволить підвищити довговічність і ресурс напрацювання сільськогосподарських машин в цілому.

За отриманими даними можна прийняти до уваги, що розроблена конструкція гідроімпульсного пресу є перспективною та ефективною.

Від ВНАУ

к.т.н., агроінженерії та технічного
сервісу інженерно-технологічного
факультету ВНАУ

Юрій ПАЛАДІЙЧУК

Здобувач третього освітньо-наукового
рівня вищої освіти ОНП
«Матеріалознавство»

Інна ТЕЛЯТНИК

« 10 » листопада 2025 р.

Від ТОВ «АБА «АСТРА»

директор з розвитку

Олександр САВУНІН

« 10 » листопада 2025 р.

Додаток К

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ НА НАУКОВО-ПРАКТИЧНИХ КОНФЕРЕНЦІЯХ

за спеціальністю 132 Матеріалознавство

Телятник Інни Анатоліївни

№ п/п	Тема доповіді	Назва конференції, місце, дата проведення
1	2	3
Апробація результатів дисертації на науково-практичних конференціях		
1.	Особливості механіки протягування внутрішніх поверхонь при виготовленні та відновленні порожнистих деталей сільськогосподарської техніки	XXIII Міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми землеробської механіки» присвячена 122-річчю з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка. Київ-Житомир. 16 – 18 жовтня 2022 р.
2.	Сучасні ресурсозберігаючі технології виробництва та відновлення виконавчих органів сільськогосподарських машин	XXIII Міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми землеробської механіки» присвячена 122-річчю з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка. Київ-Житомир. 16 – 18 жовтня 2022 р.
3.	Тенденції створення гідроімпульсного привода з програмованим керуванням	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні процеси агропромислової інженерії в умовах сталого розвитку: проблеми та перспективи». Вінниця. 20 – 21 жовтня 2022 року
4.	Зміцнення структури матеріалів поверхневою пластичною деформацією	II International Scientific and Practical Internet Conference «Scientific Research and Innovation». Dnipro. April 3-4, 2023.
5.	Обґрунтування дослідження ударно-вібраційного впливу обробки матеріалів гідравлічним імпульсним пристроєм	IX Міжнародна науково-практична конференція «Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування». Луцьк. 30 травня – 01 червня 2023 року
6.	Обґрунтування дослідження ударно-вібраційного впливу обробки матеріалів гідравлічним імпульсним пристроєм	III Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту». Вінниця. 01 – 03 червня 2023 року
7.	Вплив теплового поля на межі контактування інструменту-заготовки при механічній обробці	XXIV Міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми землеробської механіки» присвячена 123-й річчю з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 125-й річчю з дня заснування кафедри сільськогосподарських машин та системотехніки імені академіка П. М. Василенка. Київ - Голосієво. 17 – 19 жовтня 2023 р.

продовження додатку К

1	2	3
8.	Температурне поле зони контакту інструмент-деталь	XXIV Міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми землеробської механіки» присвячена 123-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 125-річчю з дня заснування кафедри сільськогосподарських машин та системотехніки імені академіка П. М. Василенка. Київ - Голосієво. 17 – 19 жовтня 2023 р.
9.	Мікроструктурний аналіз підповерхневої деформації, викликаної різанням, в результаті різних комбінацій теплових і механічних впливів	XXIV Міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми землеробської механіки» присвячена 123-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 125-річчю з дня заснування кафедри сільськогосподарських машин та системотехніки імені академіка П. М. Василенка. Київ - Голосієво. 17 – 19 жовтня 2023 р.
10.	Основи гідроімпульсного привода в вібраційному обладнанні: швидкість передачі імпульсу навантаження в середовищі заготовки	XV International Scientific and Practical Internet Conference «Modern Movement of Science». Dnipro. October 19 – 20, 2023.
11.	Розробка алгоритму експериментального дослідження гідроімпульсного пристрою для зміцнення деталей деформацією	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи агропромислової інженерії у контексті євроінтеграції». Вінниця. 19-20 жовтня 2023 року
12.	Аналіз теплового поля та цілісності поверхні в умовах різання високовуглецевих сталей	I International Scientific and Practical Internet Conference «Nuclear Potential and Possible Threats to the Modern World». Dnipro. October 26 – 27, 2023.
13.	Інтенсифікація поверхневого пластичного деформування металу при гідроімпульсному впливі	II International Scientific and Practical Internet Conference «Achievements of 21st Century Scientific Community». Dnipro. September 16 – 17 2024.
14.	Дослідження впливу поверхневої пластичної деформації на мікроструктурні зміни та механічні властивості сплавів	XVI International Scientific and Practical Internet Conference «Modern Movement of Science». Dnipro. October 14 – 15, 2024.
15.	Технологічні аспекти формування рельєфу поверхні заготовки при гідроімпульсному виглажуванні	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи агропромислової інженерії в контексті глобальних викликів». Вінниця. 17-18 жовтня 2024 р.

продовження додатку К

1	2	3
16.	Дослідження впливу деформаційного зміцнення поверхневого шару металу при гідроімпульсному впливі	Всеукраїнська науково-практична конференція «Сталий розвиток України в умовах європейської інтеграції: сучасний стан, шлях відновлення та перспективи». Вінниця. 15-16 травня 2025 р.
17.	Обґрунтування формозміни наконечника-ударника для зміни характеру деформаційного поля твердості оброблювальної поверхні	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи агропромислової інженерії: проблеми та перспективи». Вінниця. 30-31 жовтня 2025 року

Аспірантка

І. Ренна

Інна ТЕЛЯТНИК

Вчений секретар



Тетяна КОРΠΑНІЮК

М.П.

«04» листопада 2025 р.

Додаток Л
СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
за спеціальність 132 Матеріалознавство
Телятник Інни Анатоліївни

№ п/п	Назва	Назва видання та його вихідні відомості, що дозволяють ідентифікувати та відрізнити це видання від інших	Кількість друкованих сторінок / др. арк.	Співавтори
1	2	3	4	5
Статті (Web of Science/Scopus)				
1	Kinematic Characteristics of Deformed Porous Structures.	<i>Journal of Engineering Sciences</i> . 2024. Vol. 11. Issue 1. https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).d6 (Web of Science/Scopus).	<u>D. 44–53</u> 1 (0,2)	Veselovska N., Sivak R., Paladiychuk Y., Bandura V., Bohatiuk M., Savkiv V., Edl M.
Статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б», включених до міжнародної наукометричної бази даних (Index Copernicus)				
2	Типи і конструкції вібробуджувачів сучасного машинобудування.	<i>Вібрації в техніці та технологіях</i> . 2022. № 4 (107). DOI: 10.37128/2306-8744-2022-4-4. URL: http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/December2022/RCPdoCAOCaLam9zAYAZG.pdf	<u>C. 26-35</u> 0,77 (0,19)	Паладійчук Ю.Б.
3	Дослідження мікротвердості поверхні циліндричної деталі при деформаційному протягуванні.	<i>Техніка, енергетика, транспорт АПК</i> . 2022. № 3 (118). DOI: 10.37128/2520-6168-2022-3-5 URL: http://tetapk.vsau.org/storage/articles/December2022/STrrbMph4smnjOzjL0Wk.pdf	<u>C. 31-42</u> 1,08 (0,27)	Веселовська Н.Р., Паладійчук Ю.Б.
4	Дослідження поверхневої пластичної деформації при гідроімпульсному впливі.	<i>Техніка, енергетика, транспорт АПК</i> . 2023. № 1 (120). DOI: 10.37128/2520-6168-2023-1-13 URL: http://tetapk.vsau.org/storage/articles/May2023/HCh4gxVEZLwkRrnU0kkr.pdf	<u>C. 110-119</u> 0,88	-
5	Дослідження теплового циклу на поверхні заготовки внаслідок пластичної деформації при механічній обробці.	<i>Вібрації в техніці та технологіях</i> . 2023. № 2 (109). DOI: 10.37128/2306-8744-2023-2-9 URL: http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/October2023/6ugL0vI2uU2b9pE2Whdx.pdf	<u>C. 72-84</u> 1,25 (0,625)	Паладійчук Ю.Б.

продовження додатку Л

1	2	3	4	5
6	Research of the vibratory formation of the compaction of powder materials by hydro-impulse loading.	<i>Техніка, енергетика, транспорт АПК.</i> 2023. № 3 (122). DOI: 10.37128/2520-6168-2023-3-4 URL: http://tetapk.vsau.org/storage/articles/December2023/YyB8gjAl8TX8IwbnreIU.pdf	<u>С. 35–42</u> 0,87 (0,304)	Paladiychuk Y., Kubai M.
7	Алгоритм експериментального дослідження гідроімпульсного пристрою для зміцнення деталей деформацією.	<i>Техніка, енергетика, транспорт АПК.</i> 2023. № 4 (123). DOI: 10.37128/2520-6168-2023-4-4 URL: http://tetapk.vsau.org/storage/articles/January2024/Go0f2ciQxjm4yh6q73Nk.pdf	<u>С. 31-42</u> 1 (0,5)	Паладійчук Ю.Б.,
8	Metallographic study of changes in the structure of a deformed metal layer during water-pulse smoothing.	<i>Техніка, енергетика, транспорт АПК.</i> 2024. № 4 (127). DOI: 10.37128/2520-6168-2024-4-1 URL: http://tetapk.vsau.org/storage/articles/December2024/o77xpIp9UfjoNC0EaHOU.pdf	<u>С. 7–22</u> 1,5 (0,525)	Paladiychuk Y., Kubai M.
Наукові публікації в зарубіжних журналах				
9	Increasing the efficiency of choosing a hydraulic impulse drive with programmable control.	<i>Agricultural engineering.</i> 2023. Vol. 55. URL: https://doi.org/10.15544/ageng.2023.55.4	<u>P. 30-43.</u> 1,20 (0,6)	Paladiychuk Y.
Інші видання (тези доповідей)				
10	Сучасні ресурсозберігаючі технології виробництва та відновлення виконавчих органів сільськогосподарських машин	<i>Сучасні проблеми землеробської механіки:</i> збірник тез доповідей XXIII міжнародної наукової конференції присвяченій 122-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 16 – 18 жовтня 2022 р. Київ-Житомир: НУБіП, ЖАФК. 2022. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/zbirnik_konf_vasilenko_2022.pdf	<u>С. 188-190</u> 0,16 (0,08)	Паладійчук Ю. Б.
11	Особливості механіки протягування внутрішніх поверхонь при виготовленні та відновленні порожнистих деталей сільськогосподарської техніки	<i>Сучасні проблеми землеробської механіки:</i> збірник тез доповідей XXIII міжнародної наукової конференції присвяченій 122-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 16 – 18 жовтня 2022 р. Київ-Житомир: НУБіП, ЖАФК. 2022. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/zbirnik_konf_vasilenko_2022.pdf	<u>С. 191-193</u> 0,12	-

продовження додатку Л

1	2	3	4	5
12	Зміцнення структури матеріалів поверхневою пластичною деформацією	<i>Scientific Research and Innovation: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Internet Conference. 3 – 4 April 2023. Dnipro. 2023.</i> URL: http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2023/04/Conference-Proceedings-April-3-4-2023-3.pdf	<u>С. 361-363</u> 0,20	-
13	Обґрунтування дослідження ударно-вібраційного впливу обробки матеріалів гідравлічним імпульсним пристроєм	<i>Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування: матеріали ІХ Міжнародної науково–практичної конференції.</i> 30 травня – 01 червня 2023 р. Луцьк: ЛНТУ. 2023. URL: https://termm.lntu.edu.ua/index/conference-program	<u>С. 57-60</u> 0,17	-
14	Обґрунтування дослідження ударно-вібраційного впливу обробки матеріалів гідравлічним імпульсним пристроєм	<i>Перспективи розвитку машинобудування та транспорту: матеріали конференції (тези) ІІІ міжнародної науково-технічної конференції 01 – 03 червня 2023 р. Вінниця: ВНТУ. 2023.</i> URL: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2023/paper/viewFile/18348/15155	<u>С. 329-331</u> 0,16	-
15	Мікроструктурний аналіз підповерхневої деформації, викликаній різанням, в результаті різних комбінацій теплових і механічних впливів	<i>Сучасні проблеми землеробської механіки: збірник тез доповідей XXIV міжнародної наукової конференції присвяченій 123-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 125-й річниці з дня заснування кафедри сільськогосподарських машин та системотехніки імені академіка П. М. Василенка, 17 – 19 жовтня 2023 р. Київ: НУБіП. 2023.</i> URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u218/zbirnik_konf10_fin.pdf	<u>С. 331-334</u> 0,16(0,08)	Паладійчук Ю. Б.

продовження додатку Л

1	2	3	4	5
16	Вплив теплового поля на межі контактування інструменту-заготовки при механічній обробці	Сучасні проблеми землеробської механіки: збірник тез доповідей XXIV міжнародної наукової конференції присвяченій 123-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 125-й річниці з дня заснування кафедри сільськогосподарських машин та системотехніки імені академіка П. М. Василенка, 17 – 19 жовтня 2023 р. Київ: НУБіП. 2023. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u218/zbirnik_konf10_fin.pdf	<u>C. 336-339</u> 0,18	-
17	Основи гідроімпульсного привода в вібраційному обладнанні: швидкість передачі імпульсу навантаження в середовищі заготовки	<i>Modern Movement of Science: Proceedings of the 15th International Scientific and Practical Internet Conference</i> 19 – 20 October, 2023. Dnipro. 2023. URL: http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2023/10/Conference-Proceedings-October-19-20-2023-1.pdf	<u>C.404-407</u> 0,20 (0,10)	Паладійчук Ю. Б.
18	Аналіз теплового поля та цілісності поверхні в умовах різання високовуглецевих сталей	<i>Nuclear Potential and Possible Threats to the Modern World: Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Internet Conference.</i> 26 – 27 October, 2023. Dnipro. 2023. URL: http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2023/11/Conference-Proceedings-October-26-27-2023-1.pdf	<u>C. 72-75</u> 0,26	-
19	Інтенсифікація поверхневого пластичного деформування металу при гідроімпульсному впливі	<i>Achievements of 21st Century Scientific Community: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Internet Conference</i> , 16-17 September, 2024. Dnipro. 2024. URL: http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2024/09/Conference-Proceedings-September-16-17-2024.pdf	<u>C. 253-256</u> 0,21	-
20	Дослідження впливу поверхневої пластичної деформації на мікроструктурні зміни та механічні властивості сплавів	<i>Modern Movement of Science: Proceedings of the 16th International Scientific and Practical Internet Conference</i> , 14 – 15 October, 2024. Dnipro. 2024. URL: http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2024/10/Conference-Proceedings-October-14-15-2024.pdf	<u>C. 371-374</u> 0,24	-

продовження додатку Л

1	2	3	4	5
21	Аналіз механізмів деформації та мікротвердості при поверхнево-пластичній деформації	<i>Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу.</i> Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (21 листопада 2025 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. 21 листопада, 2025. Дніпро. ДДАЕУ, 2025.	<u>С.119-121</u> <u>0,11</u>	-

Усього за темою дисертаційної роботи «Дослідження деформаційного зміцнення робочих поверхонь ґрунтообробних машин гідроімпульсним навантаженням» опубліковано 21 наукових праць загальним обсягом 11,72 умовн. друк. арк. (власний доробок автора 6,004 умовн. друк. арк.) у тому числі 0,2 умовн. друк. арк. у наукометричній базі Scopus; 3,294 умовн. друк. арк. у наукових фахових виданнях категорії «Б», 0,6 умовн. друк. арк. у зарубіжному журналі та 1,91 умовн. друк. арк. у збірниках тез доповідей.

Аспірантка

Інна ТЕЛЯТНИК

Вчений секретар

Тетяна КОРПАНЮК

М.П.

«04» листопада 2025 р.