МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Кузнецов Андрій Анатолійович

УДК 631.312.021:631.316

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Підвищення надійності п’ятикорпусного плуга ПЛН-5-35 в умовах Полісся

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ Кузнецов А.А.

Керівник роботи
Грабар І.Г..
доктор технічних наук, професор

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Кузнецов Андрій Анатолійович. Підвищення надійності п'ятикорпусного плуга ПЛН-5-35 в умовах Полісся. *– Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання підвищення надійності п'ятикорпусного плуга ПЛН-5-35 під час роботи в ґрунтово-кліматичних умовах Полісся. Актуальність теми зумовлена значним абразивним зношуванням робочих органів плуга на піщаних і супіщаних ґрунтах, що призводить до зростання тягового опору, погіршення якості оранки та збільшення витрат на ремонт. У роботі проаналізовано сучасний стан експлуатації ґрунтообробних машин, основні причини втрати їх працездатності та напрями підвищення довговічності робочих органів. Особливу увагу приділено конструкції плуга ПЛН-5-35, умовам навантаження корпусів, лемешів, полиць і польових дощок, а також впливу вологості, щільності та механічного складу ґрунту на інтенсивність спрацювання деталей. Запропоновано удосконалення конструкції плуга шляхом встановлення багатогранного диска, який покращує підрізання ґрунтового шару, зменшує навантаження на корпуси та сприяє підвищенню надійності агрегату. Для підвищення зносостійкості робочих органів обґрунтовано доцільність застосування лазерного зміцнення як ефективного способу локального зміцнення поверхневого шару без значної зміни геометрії деталей. Наведені технічні рішення дають змогу підвищити ресурс робочих органів, стабілізувати якість виконання технологічної операції та зменшити простої плуга в період польових робіт. Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованих рішень під час модернізації плугів ПЛН-5-35 у сільськогосподарських підприємствах Поліської зони.

Ключові слова: плуг ПЛН-5-35, надійність, робочі органи, абразивне зношування, лазерне зміцнення, багатогранний диск.

ANNOTATION

Andriy Anatoliyovych Kuznetsov. Improving the reliability of the ПЛН-5-35 five-body plough in the Polissia region. *– Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualification work for obtaining a bachelor's degree in the specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

This qualification thesis examines ways of improving the reliability of the ПЛН-5-35 five-body plough when operating in the soil and climatic conditions of Polissia. The relevance of the topic stems from the significant abrasive wear of the plough's working parts on sandy and sandy loam soils, which leads to increased draught resistance, poorer ploughing quality and higher repair costs. This paper analyses the current state of operation of soil-tilling machinery, the main causes of loss of performance, and ways to improve the durability of working parts. Particular attention is paid to the design of the ПЛН-5-35 plough, the loading conditions on the plough bodies, ploughshares, mouldboards and field boards, as well as the influence of soil moisture, density and mechanical composition on the rate of wear of the components. An improvement to the plough's design is proposed, involving the installation of a multi-faceted disc, which improves the cutting of the soil layer, reduces the load on the bodies and helps to increase the reliability of the unit. To increase the wear resistance of the working parts, the feasibility of using laser hardening as an effective method of locally strengthening the surface layer without significantly altering the geometry of the components is substantiated. The technical solutions presented make it possible to extend the service life of the working parts, stabilise the quality of the agricultural operation and reduce plough downtime during field work. The practical significance of this work lies in the possibility of applying the proposed solutions during the modernisation of ПЛН-5-35 ploughs at agricultural enterprises in the Polissia region.

Keywords: ПЛН-5-35 plough, reliability, working parts, abrasive wear, laser hardening, multi-faceted disc.

ЗМІСТ

ВСТУП……..……..……5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН……...……9
РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ЗМІЦНЕННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ПЛУГА ПЛН-5-35, ЯКИЙ ПРАЦЮЄ В УМОВАХ ПОЛІССЯ……18
РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТИВНА РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНОГО ПЛУГА ПЛН-5-35……..……..33
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……...……41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…….43

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасне сільськогосподарське виробництво потребує високоефективного використання машинно-тракторного парку, особливо під час виконання енергоємних технологічних операцій основного обробітку ґрунту. Однією з найважливіших операцій у системі землеробства залишається оранка, від якості виконання якої залежить структура орного шару, накопичення та збереження вологи, заробляння рослинних решток, знищення бур’янів і створення сприятливих умов для росту та розвитку сільськогосподарських культур. Для виконання цієї операції в аграрних підприємствах широко застосовуються лемішно-полицеві плуги, зокрема п’ятикорпусний плуг ПЛН-5-35, який використовується в агрегаті з тракторами відповідного тягового класу.

В умовах Полісся експлуатація ґрунтообробних машин має низку особливостей, пов’язаних із механічним складом ґрунтів, підвищеною вологістю, неоднорідністю орного шару, наявністю рослинних решток, кореневих включень і абразивних частинок піску. Такі умови призводять до інтенсивного зношування робочих органів плуга, зростання тягового опору, погіршення якості обробітку ґрунту, збільшення витрат палива та частоти ремонтно-обслуговувальних робіт. Найбільш навантаженими деталями плуга є лемеші, полиці, польові дошки, стійки корпусів і дискові елементи, які безпосередньо взаємодіють із ґрунтовим середовищем. Втрата їх працездатності знижує загальну надійність машини та негативно впливає на своєчасність виконання польових робіт.

Актуальність теми кваліфікаційної роботи зумовлена необхідністю підвищення надійності п’ятикорпусного плуга ПЛН-5-35 під час роботи в умовах Полісся шляхом удосконалення його конструкції та підвищення зносостійкості робочих органів. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є встановлення багатогранного диска, який покращує підрізання ґрунтового шару, зменшує навантаження на корпуси плуга та сприяє

стабільнішому виконанню технологічного процесу оранки. Крім того, важливим резервом підвищення довговічності робочих органів є застосування сучасних способів поверхневого зміцнення, зокрема лазерного зміцнення, що дозволяє підвищити твердість і зносостійкість поверхневого шару без істотної зміни геометричних параметрів деталей.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення надійності п’ятикорпусного плуга ПЛН-5-35 в умовах Полісся за рахунок удосконалення конструкції плуга встановленням багатогранного диска та обґрунтування способу зміцнення його робочих органів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– проаналізувати сучасний стан експлуатації ґрунтообробних машин і визначити основні напрями підвищення їх надійності;

– розглянути конструктивні особливості плуга ПЛН-5-35 та умови його роботи в зоні Полісся;

– визначити основні причини втрати працездатності робочих органів плуга;

– проаналізувати існуючі способи зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин;

– обґрунтувати доцільність застосування лазерного зміцнення для деталей, що працюють в абразивному ґрунтовому середовищі;

– розробити конструктивне удосконалення плуга шляхом встановлення багатогранного диска;

– виконати необхідні інженерні розрахунки, що підтверджують працездатність запропонованого технічного рішення;

– оцінити очікуваний вплив запропонованого удосконалення на якість виконання технологічної операції та надійність плуга.

Об’єктом дослідження є технологічний процес роботи п’ятикорпусного плуга ПЛН-5-35 під час основного обробітку ґрунту в умовах Полісся.

Предметом дослідження є закономірності зношування, навантаження та підвищення надійності робочих органів плуга ПЛН-5-35 за рахунок конструктивного удосконалення і застосування лазерного зміцнення.

Методи дослідження включають аналіз науково-технічної літератури, узагальнення досвіду експлуатації ґрунтообробних машин, порівняльну оцінку способів зміцнення робочих органів, інженерні розрахунки параметрів удосконаленої конструкції, графічне моделювання та техніко-експлуатаційне обґрунтування запропонованих рішень.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Грабар Іван, **Кузнєцов Андрій,** Юрченко Богдан. Адитивне відновлення деталей робочих органів ґрунтообробних машин. Інновації в агропромисловому комплексі, машинобудуванні та транспорті. Матеріали доповідей. Національний університет водного господарства та природокористування, 22–23 квітня 2026 року. С. 52-54.

2. Грабар І. Г., Міненко С. В., Бистрицький Б. П., Мельник Р. П., **Кузнєцов А. А.** Особливості зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання» з нагоди 119-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, віцепрезидента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906-1987) 19-20 лют. 2026 р., м. Київ / МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2026. С. 90-91.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованого конструктивного рішення для модернізації плугів ПЛН-5-35, які експлуатуються в сільськогосподарських підприємствах Поліської зони. Встановлення багатогранного диска дозволяє покращити якість підрізання ґрунтового шару, зменшити навантаження на корпуси плуга та знизити інтенсивність зношування робочих органів. Застосування лазерного зміцнення сприяє підвищенню довговічності деталей, скороченню простоїв техніки,

зменшенню витрат на ремонт і забезпеченню стабільної роботи агрегату протягом польового сезону.

Отже, підвищення надійності плуга ПЛН-5-35 в умовах Полісся є важливим інженерним завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню ефективності основного обробітку ґрунту, зменшенню експлуатаційних витрат і покращенню техніко-економічних показників роботи сільськогосподарського підприємства.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновку та списку використаних джерел з 23 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 44 сторінки комп’ютерного тексту, містить 11 рисунків, 15 таблиць та 2 додатки.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН

1.1 Значення основного обробітку ґрунту та умови Полісся

Основний обробіток ґрунту є однією з найбільш енергоємних операцій у землеробстві, оскільки під час оранки робочі органи машини безпосередньо руйнують і переміщують значну масу ґрунту. Якість цієї операції визначає подальше накопичення вологи, загортання рослинних решток, знищення бур'янів і можливість рівномірного передпосівного обробітку. Тому надійність плуга має не лише технічне, а й технологічне значення: кожна відмова у сезон призводить до простою агрегату та порушення строків виконання робіт.

Плуг ПЛН-5-35 призначений для оранки на глибину до 30 см і має п'ять корпусів із шириною захвату по 0,35 м. Загальна ширина захвату становить 1,75 м, що забезпечує достатню продуктивність при агрегатуванні з тракторами відповідного тягового класу. Разом із тим у зоні Полісся плуг працює в умовах підвищеної вологості, неоднорідного механічного складу ґрунту, наявності дернини, кореневих решток і твердих включень. Такі фактори збільшують тяговий опір та викликають пульсацію навантаження.

Найбільш небезпечними для плуга є короткочасні пікові навантаження, які виникають під час входження корпуса у щільний пласт, при зустрічі з корінням, каменем або перезволоженою грудкою. У таких умовах леміш і груди відвала не тільки підрізають пласт, а й фактично відривають його від необробленого масиву. Це прискорює зношування робочих органів, послаблює кріплення, створює додаткові згинальні моменти в стійках і рамі. Отже, підвищення надійності доцільно пов'язувати зі зниженням навантаження на корпус ще до основного різання ґрунту.

Таблиця 1.1 – Умови роботи плуга в зоні Полісся

Фактор	Прояв	Вплив на надійність
Підвищена вологість	Налипання ґрунту, збільшення тертя	Зростання тягового опору і зношування
Дернина та корені	Щільний поверхневий шар	Пульсація навантаження, забивання корпусів
Неоднорідність ґрунту	Чергування супісків, суглинків і ущільнених ділянок	Нестабільна глибина та нерівномірне навантаження
Камені та тверді включення	Локальні удари по робочих органах	Деформації, тріщини, послаблення болтів
Стислі строки робіт	Інтенсивне сезонне використання	Підвищена ймовірність відмов

1.2 Аналіз конструкції і робочого процесу ПЛН-5-35

ПЛН-5-35 належить до лемішно-відвальних плугів. Його основними вузлами є рама, начіпний пристрій, корпуси, передплужники або ґрунтознімачі, опорне колесо, механізми регулювання та комплект кріпильних елементів. Кожен корпус підрізає пласт знизу, відокремлює його збоку, переміщує по відвалу, перевертає та частково кришить. Стабільність цього процесу залежить від гостроти лемеша, правильності встановлення корпуса, стану польової дошки та здатності плуга утримувати задану глибину.

Конструкція плуга є простою і ремонтопридатною, однак у важких умовах експлуатації її слабкими місцями стають стійки корпусів, отвори під болтові з'єднання, лемеші, груди відвалів, польові дошки та вузол опорного колеса. Коли робочий орган рухається у нерозрізаному пласті, бокова складова сили зростає, а корпус отримує додатковий поворотний момент. Унаслідок цього навантаження розподіляється нерівномірно між корпусами, а рама працює в умовах циклічного згину та кручення.

Аналіз робочого процесу показує, що резерв підвищення надійності полягає у попередньому розрізанні пласта перед корпусом. Якщо бокова межа пласта формується окремим диском, леміш працює у сприятливіших умовах, зменшується відривання ґрунту від масиву, знижується забивання рослинними рештками та зменшується пульсація тягового опору. Саме тому як

перспективний напрям модернізації прийнято встановлення багатогранного диска.

Таблиця 1.2 – Вихі ні параметри плуга для подальшого аналізу

Показник	Позначення	Значення
Кількість корпусів	n	5 шт.
Ширина захвату одного корпуса	b	0,35 м
Загальна ширина захвату	B	1,75 м
Робоча глибина оранки	a	0,20-0,30 м
Раціональна швидкість руху	v	6-8 км/год
Питомий опір ґрунту Полісся	k	35-55 кН/м²

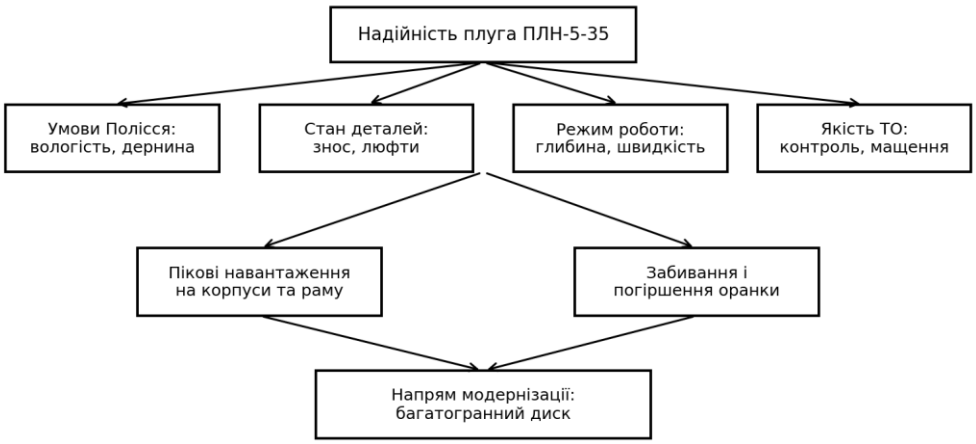


Рис. 1.1. Схема основних факторів, що впливають на надійність плуга.

1.3 Показники надійності та характерні відмови плугів

Надійність ґрунтообробної машини - це здатність виконувати задані функції у встановлених режимах протягом необхідного часу. Для плуга найважливішими складовими є безвідмовність, довговічність, ремонтопридатність і збережуваність. Безвідмовність визначає роботу без зупинок упродовж зміни або сезону; довговічність характеризує ресурс деталей до граничного стану; ремонтопридатність відображає швидкість відновлення працездатності після відмови.

Відмови плуга бувають поступовими і раптовими. Поступові пов'язані зі спрацюванням лемешів, відвалів і польових дощок. Вони проявляються у збільшенні тягового опору, погіршенні заглиблення та якості обертання пласта.

Раптові відмови виникають при ударних перевантаженнях: руйнуванні кріплення, деформації стійки, тріщині рами або заклинюванні опорного колеса. Для польових робіт особливо небезпечними є саме раптові відмови, бо вони спричиняють непродуктивні простої.

Практичний аналіз показує, що багато відмов мають спільну першопричину - надмірну змінність навантаження. Затуплений леміш збільшує опір входження у ґрунт, через що корпус починає вібрувати; вібрація послаблює болти; зміщення корпуса погіршує якість оранки і ще більше підвищує опір. Отже, надійність доцільно підвищувати не тільки зміцненням деталей, а й зменшенням навантаження, яке ці деталі сприймають.

Таблиця 1.3 – Характерні відмови та їх наслідки.

Вузол	Типова відмова	Наслідок
Леміш	Затуплення, викришування кромки	Зростання опору, погіршення підрізання пласта
Відвал	Знос грудей і крила, налипання	Погіршення обертання пласта
Стійка корпуса	Деформація або тріщина	Порушення положення корпуса, зупинка агрегату
Кріплення	Послаблення болтів, овальність отворів	Люфти, вібрація, нерівномірна глибина
Рама	Місцеві деформації біля кронштейнів	Порушення геометрії плуга
Опорне колесо	Люфт або заклинювання підшипника	Погіршення стабілізації глибини

1.4 Орієнтовне оцінювання навантаження на корпуси

Для обґрунтування напряму модернізації виконаємо спрощене оцінювання тягового опору плуга. Розрахунковий опір лемішно-відвального плуга можна подати у вигляді:

$$R = k \cdot b \cdot a \cdot n \cdot \varphi, \tag{1.1}$$

де R – тяговий опір плуга, кН; k – питомий опір ґрунту, кН/м²; b – ширина захвату одного корпуса, м; a – глибина оранки, м; n – кількість корпусів; φ – коефіцієнт нерівномірності умов роботи. Для ПЛН-5-35 приймаємо b = 0,35 м, n = 5, a = 0,25 м, k = 45 кН/м² і φ = 1,15. Тоді:

$$R = 45 \cdot 0{,}35 \cdot 0{,}25 \cdot 5 \cdot 1{,}15 = 22{,}64 \text{ кН}. \tag{1.2}$$

Середнє навантаження на один корпус становить $R_к$ = 22,64/5 = 4,53 кН. За наявності дернини або твердого включення короткочасне перевантаження може досягати β = 1,4, тому $R_{к\ max}$ = 4,53 · 1,4 = 6,34 кН. Якщо багатогранний диск зменшує навантаження на корпуси на 10 %, то розрахунковий опір модернізованої схеми дорівнює 20,38 кН, а пікове навантаження на корпус - 5,71 кН.

Таблиця 1.4 – Результати орієнтовного розрахунку

Показник	Базовий плуг	З багатогранним диском
Розрахунковий тяговий опір, кН	22,64	20,38
Середнє навантаження на корпус, кН	4,53	4,08
Пікове навантаження на корпус, кН	6,34	5,71
Відносне зниження навантаження, %	-	близько 10

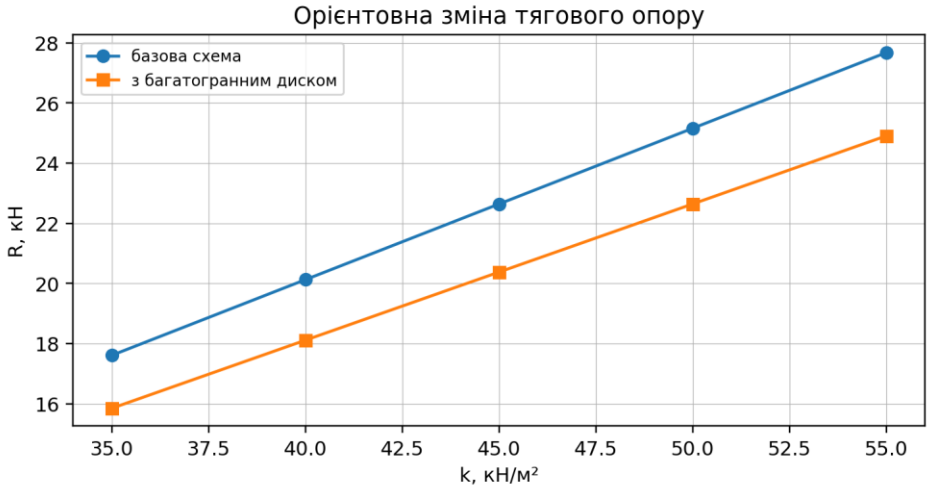


Рис. 1.2. Залежність розрахункового тягового опору від питомого опору ґрунту

1.5 Обґрунтування напряму підвищення надійності

Підвищення надійності плуга може здійснюватися за рахунок зміцнення робочих органів, використання зносостійких матеріалів, покращення регулювань, дотримання регламенту технічного обслуговування та зміни конструкції. Однак для умов Полісся найбільш актуальним є зменшення пікових навантажень, оскільки саме вони спричинюють деформації, тріщини, послаблення кріплень і прискорене спрацювання деталей.

Установка багатогранного диска перед корпусом дає змогу попередньо розрізати поверхневий шар, дернину і рослинні рештки. У результаті пласт відокремлюється від необробленого масиву більш рівномірно, а корпус сприймає меншу бокову складову опору. Багатогранна форма створює переривчасту ріжучу кромку, яка краще працює на вологій дернині та знижує ковзання порівняно з гладким диском. Такий робочий орган має бути встановлений з можливістю регулювання глибини та положення відносно лемеша.

Очікуваний ефект модернізації полягає не лише у зменшенні тягового опору. Попереднє розрізання пласта покращує якість оранки, знижує забивання корпусів, зменшує коливання рами і підвищує ресурс болтових з'єднань. Якщо інтенсивність відмов базового плуга умовно прийняти $\lambda_б = 4/420 = 0{,}0095$ год$^{-1}$, то середній наробіток на відмову становить 105 год. За зменшення відмов на 15 % інтенсивність становитиме $\lambda_м = 0{,}0081$ год$^{-1}$, а наробіток на відмову зросте до 123 год. Це підтверджує доцільність конструктивного розвантаження корпусів.

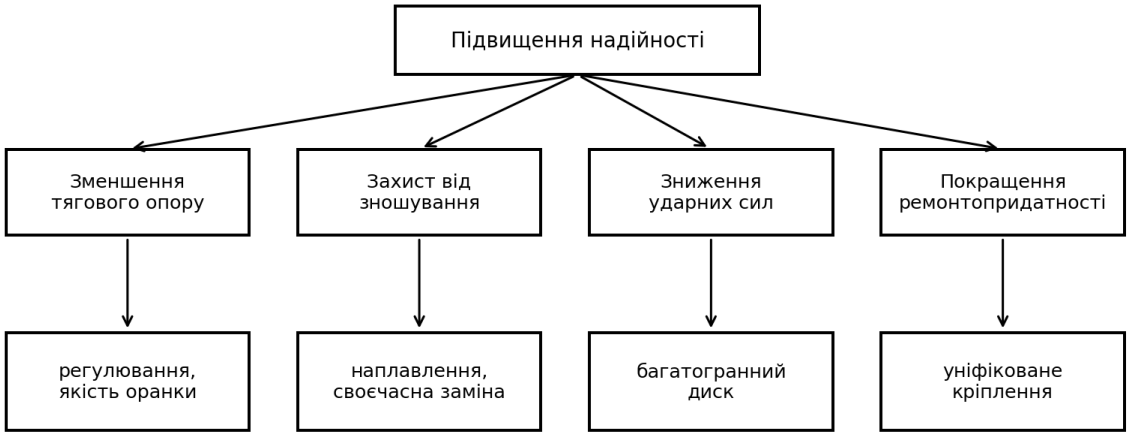


Рис. 1.3. Структурна схема напрямів підвищення надійності ґрунтообробної машини

Таблиця 1.5 – Порівняння напрямів підвищення надійності

Напрям	Переваги	Обмеження
Зміцнення лемешів	Підвищує ресурс ріжучих кромок	Не зменшує ударні навантаження
Регулювання плуга	Зменшує перевитрати енергії	Потребує постійного контролю
Посилення рами	Підвищує запас міцності	Збільшує масу, не усуває причину
Гладкий дисковий ніж	Розрізає пласт і рештки	Може ковзати на вологій дернині
Багатогранний диск	Зменшує пульсацію сил і покращує розрізання дернини	Потребує розрахунку кріплення та захисту підшипника

1.6 Експлуатаційні заходи, що доповнюють конструктивне вдосконалення

Конструктивне встановлення багатогранного диска буде ефективним лише за умови правильної експлуатації плуга. Перед початком роботи необхідно перевірити горизонтальність рами, однакову глибину ходу корпусів, гостроту лемешів і стан різьбових з'єднань. Якщо плуг має перекіс відносно напрямку руху або різну глибину заглиблення корпусів, навіть модернізований робочий орган не забезпечить рівномірного розподілу навантаження. У таких умовах окремі корпуси сприйматимуть підвищений опір, що зменшить очікуваний ресурс машини.

Під час сезонної роботи доцільно виконувати щозмінний контроль найбільш навантажених вузлів. Особливу увагу слід приділяти кріпленню корпусів до рами, стану стійок, затягуванню болтів лемешів і відвалів, наявності люфтів у підшипникових вузлах та опорному колесі. Для багатогранного диска важливим є контроль вільного обертання, відсутності забивання ґрунтом і правильного заглиблення. Диск повинен розрізати поверхневий шар, але не створювати надмірного додаткового опору.

В умовах Полісся потрібно враховувати вологість ґрунту. Оранка перезволоженого поля різко збільшує налипання і тертя, а робота по пересушеному ущільненому шару підвищує ударність навантаження. Тому вибір строків виконання операції є частиною системи забезпечення надійності.

Раціональна швидкість руху також має значення: при надмірній швидкості збільшуються динамічні сили, а при надто малій швидкості погіршується обертання пласта і зростає ризик забивання.

Після завершення сезону плуг необхідно очистити від ґрунту, перевірити стан робочих поверхонь, законсервувати різьбові з'єднання та відкриті металеві ділянки. Зберігання під відкритим небом без очищення і захисту прискорює корозію, ускладнює наступне регулювання та зменшує ресурс підшипників. Таким чином, надійність плуга формується комплексом заходів: конструктивним розвантаженням корпусів, якісним технічним обслуговуванням і дотриманням раціональних режимів роботи.

Таблиця 1.6 – Експлуатаційні заходи підвищення надійності плуга

Захід	Періодичність	Очікуваний результат
Перевірка затягування болтів корпусів і лемешів	Перед зміною та після роботи на важких ділянках	Зменшення люфтів і ударних навантажень
Контроль глибини і положення рами	Під час налаштування агрегату	Рівномірний розподіл навантаження між корпусами
Огляд багатогранного диска і підшипника	Щозмінно	Стабільне розрізання пласта без заклинювання
Очищення робочих органів від налипання	За потребою протягом зміни	Зниження тягового опору та забивання
Післясезонна консервація	Після завершення польових робіт	Зменшення корозії і підготовка до наступного сезону

Висновки по розділу

У першому розділі встановлено, що надійність плуга ПЛН-5-35 у зоні Полісся визначається не тільки міцністю деталей, а й особливостями взаємодії корпусів із вологим, дернистим і неоднорідним ґрунтом. Найбільший негативний вплив мають пікові навантаження, які виникають під час роботи в нерозрізаному пласті та при зустрічі з твердими включеннями.

Характерними відмовами плуга є зношування лемешів і відвалів, деформація стійок, послаблення болтових з'єднань, пошкодження рами та порушення роботи опорного колеса. Ці відмови призводять до зниження якості

оранки, збільшення тягового опору та простоїв агрегату в напружені періоди польових робіт.

Орієнтовний розрахунок показав, що за типових умов тяговий опір плуга може становити 22,64 кН, а пікове навантаження на один корпус - 6,34 кН. Попереднє розрізання пласта багатогранним диском дає можливість зменшити ці навантаження приблизно на 10 %, що створює передумови для підвищення ресурсу корпусів, стійок і кріплень.

Отже, для подальшого проєктування обґрунтовано напрям удосконалення плуга ПЛН-5-35 шляхом встановлення багатогранного диска. Таке рішення поєднує технологічний ефект, пов'язаний із кращим розрізанням дернини та рослинних решток, і надійнісний ефект, що полягає у зменшенні навантаження на корпуси та раму плуга.

РОЗДІЛ 2
ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ЗМІЦНЕННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ПЛУГА ПЛН-5-35, ЯКИЙ ПРАЦЮЄ В УМОВАХ ПОЛІССЯ

2.1 Умови роботи робочих органів плуга в зоні Полісся

Робочі органи плуга ПЛН-5-35 працюють у безпосередньому контакті з ґрунтовим середовищем, тому їх працездатність визначається не лише властивостями металу, а й механічним складом ґрунту, вологістю, наявністю рослинних решток, твердих включень та режимом роботи агрегату. Для зони Полісся характерні дерново-підзолисті ґрунти, значна частка піщаних і супіщаних різновидів, підвищена вологість у весняно-осінній період, а також неоднорідність орного шару за щільністю. У таких умовах леміш, відвал, польова дошка, стійка корпуса та дискові робочі органи зазнають одночасної дії різання, тертя ковзання, ударів і корозійно-механічного впливу.

Особливість Полісся полягає у поєднанні двох протилежних чинників. З одного боку, легкі ґрунти мають менший середній опір різанню, ніж важкі суглинки. З іншого боку, значна кількість кварцових частинок у піщаній фракції створює інтенсивну абразивну дію. За підвищеної вологості ґрунт може налипати на робочі поверхні, збільшуючи коефіцієнт тертя та порушуючи нормальне обертання пласта. Тому навіть при порівняно невеликому питомому опорі ґрунту робочі органи плуга швидко втрачають геометрію, а якість оранки погіршується.

Найбільш навантаженими деталями корпусу є носок і лезо лемеша, груди відвала, нижня частина відвальної поверхні та польова дошка. Леміш підрізає пласт і сприймає найбільшу частину абразивного зношування по ріжучій кромці. Відвал переміщує, кришить і обертає пласт, тому його поверхня постійно шліфується ґрунтовими частинками. Польова дошка утримує корпус від бокового відхилення, сприймає реакцію стінки борозни і працює в режимі тертя ковзання. У результаті ресурс цих деталей є одним із визначальних показників надійності всього плуга.

Для ПЛН-5-35 проблема зношування посилюється тим, що плуг має п'ять корпусів, а отже нерівномірність роботи хоча б одного з них впливає на хід усього агрегату. Затуплений леміш одного корпуса збільшує опір, порушує рівномірність глибини і створює додаткові коливання рами. Це призводить до прискореного послаблення болтових з'єднань, зростання навантаження на стійки та підвищення витрат палива. Отже, підвищення зносостійкості робочих органів слід розглядати як один із головних шляхів підвищення надійності плуга в польових умовах.

Таблиця 2.1 – Фактори експлуатації робочих органів плуга в умовах Полісся.

Фактор	Характер прояву	Вплив на робочі органи
Піщаний і супіщаний склад ґрунту	Підвищена частка твердих абразивних частинок	Інтенсивне спрацювання леза лемеша та нижніх зон відвала
Підвищена вологість	Налипання ґрунту, зростання тертя, корозійна дія	Збільшення тягового опору, нерівномірний знос поверхонь
Дернина та корені	Періодичні ривки при підрізанні пласта	Ударно-абразивні навантаження на леміш і стійку
Камені та тверді включення	Локальні удари по ріжучій кромці	Викришування, загини, тріщини, деформації
Стислі строки оранки	Інтенсивна робота без тривалих зупинок	Швидке досягнення граничного стану деталей

2.2 Причини та умови втрати працездатності робочих органів плуга

Втрата працездатності робочих органів плуга - це стан, за якого деталь не забезпечує заданої якості технологічної операції або створює надмірне навантаження на інші вузли машини. Для лемеша таким станом є затуплення леза, надмірне спрацювання носка, зменшення ширини захвату та порушення здатності до самозаглиблення. Для відвала - збільшення шорсткості, зношування грудей, утворення задирок, тріщин або зміна форми. Для польової дошки - зменшення товщини, перекіс і збільшення люфту у кріпленнях.

Основною причиною втрати працездатності є абразивне зношування. Під час руху плуга частинки ґрунту ковзають по поверхні лемеша і відвала, діючи як мікрорізці. Вони знімають найдрібніші частинки металу, утворюють риски,

борозенки та поступово змінюють геометрію робочої поверхні. Чим твердіші частинки ґрунту і чим більший тиск у зоні контакту, тим швидше відбувається спрацювання. У супіщаних ґрунтах Полісся небезпека полягає саме у наявності великої кількості кварцових зерен, твердість яких перевищує твердість незміцненої вуглецевої сталі.

Другим важливим механізмом є ударно-абразивне зношування. Воно виникає під час зустрічі лемеша з корінням, ущільненими грудками, мерзлими ділянками або камінням. Удар викликає локальну пластичну деформацію кромки, мікротріщини, викришування зміцненого шару або відшарування наплавленого матеріалу. У реальних умовах ці механізми не діють окремо: після удару пошкоджена кромка стає нерівною, а нерівності надалі прискорено зношуються абразивними частинками.

Третьою причиною є корозійно-механічний вплив. Підвищена вологість ґрунту та зберігання плуга без очищення сприяють утворенню корозійних плівок. Під час наступної роботи ці плівки знімаються, відкриваючи свіжу поверхню металу, що прискорює зношування. Корозійно-механічна дія особливо небезпечна для болтових з'єднань і зон концентрації напружень, оскільки вона полегшує зародження тріщин.

Суттєве значення мають режими роботи агрегату. Збільшення швидкості руху підвищує інтенсивність ударів і динамічну складову навантаження. Надмірна глибина оранки збільшує нормальний тиск на робочі поверхні, а неправильно відрегульована рама призводить до перевантаження окремих корпусів. Якщо леміш затуплений, плуг гірше заглиблюється, що змушує оператора збільшувати навантаження, змінювати регулювання або працювати з підвищеним буксуванням трактора. Усе це формує замкнений цикл прискореного зношування і зниження надійності.

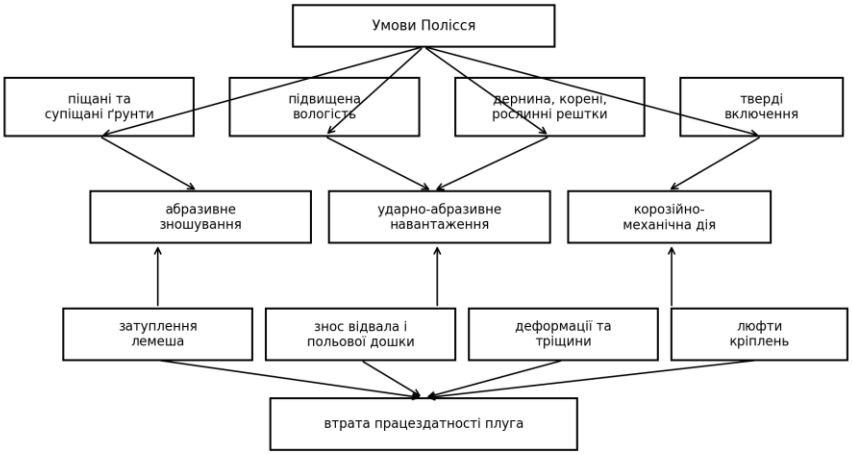


Рис. 2.1 – Причинно-наслідкова схема втрати працездатності робочих органів плуга.

Таблиця 2.2 – Ознаки граничного стану робочих органів плуга.

Деталь	Основна ознака втрати працездатності	Наслідок для технологічного процесу
Леміш	Затуплення леза, знос носка, зменшення ширини захвату	Погіршення підрізання пласта, збільшення тягового опору
Відвал	Знос грудей, подряпини, підвищена шорсткість, тріщини	Погіршення кришення та обертання пласта, налипання ґрунту
Польова дошка	Зменшення товщини та площі контакту, перекіс	Нестійкий хід корпуса, бокове зміщення плуга
Дисковий ніж або багатогранний диск	Затуплення граней, люфт підшипника, нерівномірний хід	Неповне розрізання дернини, забивання рослинними рештками
Кріплення робочих органів	Послаблення болтів, овальність отворів	Вібрація, зміщення деталей, прискорене руйнування

2.3 Характер зношування лемеша, відвала та інших деталей корпусу

Леміш є деталлю, яка першою входить у ґрунт і формує початкове руйнування пласта. Найбільше спрацьовується носок, тому що на нього припадає початковий контакт із нерозпушеним ґрунтом. Далі за інтенсивністю зношування йде ріжуча кромка, яка працює в режимі ковзного різання. Якщо твердість матеріалу лемеша недостатня, кромка швидко заокруглюється, а кут різання збільшується. Навіть невелике затуплення призводить до підвищення

тягового опору, погіршення заглиблення і росту навантаження на стійку корпуса.

Відвал зношується нерівномірно. На грудях відвала спостерігається найбільший тиск, оскільки саме ця зона приймає піднятий лемешем пласт і змінює напрям його руху. Нижня частина відвала шліфується ґрунтом і за наявності вологи може вкриватися налиплим шаром. Крила відвала зазвичай зношуються повільніше, але вони визначають повноту обертання пласта, тому їх форма також має бути збережена.

Польова дошка має інший характер зношування. Вона не бере участі в різанні, але сприймає бокову реакцію стінки борозни. З часом її робоча площина стирається, а отвори кріплення можуть набувати овальної форми через мікропереміщення. Це викликає нестійкість корпуса, збільшення бічних коливань та додаткове навантаження на раму плуга. Якщо не контролювати цей вузол, поступовий знос польової дошки може стати причиною раптової відмови кріплення.

Для модернізованого плуга ПЛН-5-35 важливим є також стан багатогранного диска, який установлюється для попереднього розрізання пласта. Його грані працюють в умовах різання дернини і рослинних решток, а також періодичних ударів. Затуплення диска зменшує його технологічний ефект і повертає частину навантаження на корпуси. Тому принцип зміцнення доцільно поширювати не лише на леміш і відвал, а й на ріжучі кромки багатогранного диска.

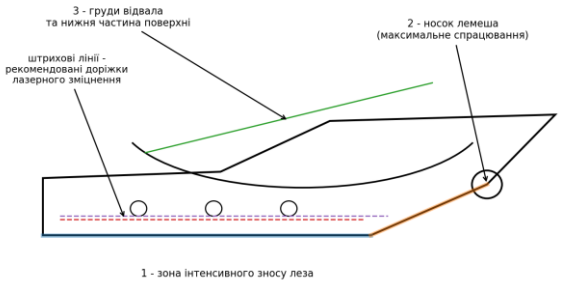


Рис. 2.2. Схема зон інтенсивного зношування та рекомендованого лазерного зміцнення робочого органа.

2.4 Аналіз існуючих способів зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин

Для підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин застосовують різні способи зміцнення: термічну обробку, хіміко-термічне насичення, індукційне гартування, газополуменеве або дугове наплавлення, плазмове зміцнення, нанесення покриттів, використання змінних твердосплавних пластин, електроіскрове легування та лазерну обробку. Кожний спосіб має переваги, але його ефективність залежить від умов експлуатації, форми деталі, доступності обладнання та необхідності збереження геометрії ріжучої кромки.

Об'ємне термічне гартування є відносно простим і дешевим способом, але воно не завжди забезпечує потрібну зносостійкість у найбільш навантажених локальних зонах. Крім того, підвищення твердості всього перерізу може знизити ударну в'язкість деталі. Для лемеша, який працює в умовах ударів і згину, надмірна крихкість є небажаною. Тому об'ємне гартування доцільно розглядати як базову підготовку матеріалу, але не як єдиний спосіб підвищення ресурсу.

Наплавлення твердими сплавами дозволяє отримати шар високої твердості та відновити зношені розміри. Воно широко застосовується у ремонті робочих органів, однак має низку обмежень. Наплавлений шар може мати нерівномірну товщину, зони перегріву, залишкові напруження і схильність до відшарування при ударних навантаженнях. Крім того, наплавлення збільшує масу кромки, може порушувати самозагострення і потребує подальшої механічної обробки.

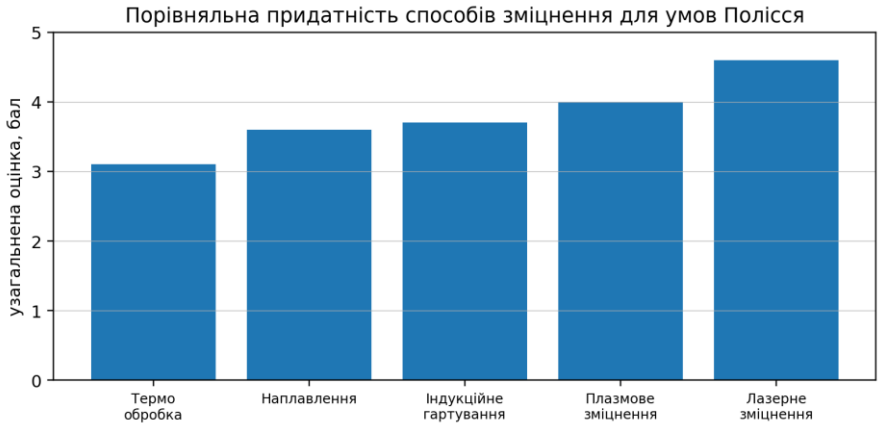
Індукційне гартування забезпечує швидке нагрівання поверхні струмами високої частоти і дає змогу сформувати зміцнений шар на ріжучій зоні. Метод продуктивний, але ефективний переважно для деталей простої форми та потребує спеціальних індукторів. Для лемеша і відвала складної просторової форми забезпечити однакову глибину зміцнення по всій потрібній зоні складніше.

Плазмове зміцнення і нанесення зносостійких покриттів забезпечують високу твердість поверхні та можуть істотно збільшити ресурс. Водночас ці методи потребують дорогого обладнання, ретельної підготовки поверхні, контролю тепловкладення та захисту від дефектів покриття. У польових ремонтних умовах їх застосування може бути обмеженим, а для тонких робочих органів існує ризик термічних деформацій.

Лазерне зміцнення є локальним способом поверхневої обробки, за якого тонкий поверхневий шар нагрівається до температури аустенітизації і швидко охолоджується за рахунок відведення тепла в основний метал. У результаті формується дрібнодисперсна загартована структура з підвищеною твердістю. Основна перевага методу - можливість зміцнювати лише ті ділянки, які інтенсивно зношуються, зберігаючи в'язку серцевину деталі та мінімізуючи деформації.

Таблиця 2.3 – Порівняння способів зміцнення робочих органів плуга

Спосіб зміцнення	Переваги	Недоліки	Придатність для умов Полісся
Об'ємне гартування	Простота, доступність, підвищення твердості всього виробу	Можливе зниження ударної в'язкості, недостатня локальна зносостійкість	Середня; доцільне як базова обробка
Наплавлення твердими сплавами	Висока твердість, можливість відновлення зношених розмірів	Перегрів, деформації, ризик відшарування, потреба в обробці	Добра для ремонту, але не завжди оптим. для тонких кромок
Індукційне гартування	Висока продуктивність, відносно стабільна якість	Потреба у спеціальних індукторах, складність для деталей складної форми	Добра для простих лез і серійної обробки
Плазмове зміцнення	Висока твердість і глибина впливу, можливість локальної обробки	Складність контролю тепловкладення, дорожче обладнання	Добра, але з ризиком деформацій
Твердосплавні пластини	Дуже висока зносостійкість ріжучої зони	Висока вартість, крихкість при ударах, складність кріплення	Обмежена для кам'янистих і дернистих ділянок
Лазерне зміцнення	Точна локалізація, мала зона термічного впливу, мінімальні деформації, збереження в'язкої основи	Потреба у спеціальному обладнанні та підборі режиму	Найбільш доцільне для локально навантажених кромок



Рису. 2.3. Узагальнена порівняльна оцінка способів зміцнення робочих органів.

2.5 Обґрунтування вибору лазерного зміцнення для робочих органів ПЛН-5-35

Вибір способу зміцнення для умов Полісся повинен забезпечувати не максимальну твердість сама по собі, а оптимальне поєднання зносостійкості, ударної в'язкості, збереження геометрії та технологічної придатності. Робочі органи плуга мають відносно тонкі кромки і працюють в умовах абразивного та ударно-абразивного навантаження. Якщо зміцнити всю деталь занадто глибоко, вона може стати крихкою; якщо застосувати товсте наплавлення, можна порушити самозагострення і збільшити ризик відшарування. Лазерна обробка дає можливість уникнути цих недоліків.

Лазерне зміцнення доцільне тому, що дозволяє створити твердий поверхневий шар у зоні контакту з ґрунтом, залишаючи серцевину металу достатньо пластичною для сприйняття ударів. За правильно підібраного режиму глибина зміцненого шару для лемеша може становити близько 0,8-1,5 мм, а твердість поверхні - 52-58 HRC залежно від матеріалу і вмісту вуглецю. Такий шар протидіє мікрорізанню абразивними частинками, а в'язка основа запобігає крихкому руйнуванню деталі.

Для робочих органів ПЛН-5-35 найбільш доцільним є не суцільне зміцнення всієї поверхні, а локальна обробка функціональних зон. На лемеші лазерні доріжки слід розміщувати вздовж ріжучої кромки та в зоні носка. На

відвалі - в нижній частині грудей, де діє найбільший тиск пласта. На багатогранному диску - по ріжучих гранях або сегментах, які контактують з дерниною. Такий підхід забезпечує ефект рівностійкості: найбільш навантажені ділянки отримують більшу зносостійкість, а менш навантажені не перевитрачають ресурс і не стають крихкими.

Додатковою перевагою лазерного зміцнення є можливість формування переривчастих доріжок. Переривчасте зміцнення зменшує залишкові напруження, полегшує самозагострення кромки і знижує ризик утворення суцільної крихкої зони. Для умов Полісся, де можливі удари об коріння та камені, це важливо. Зміцнені ділянки протидіють абразиву, а незміцнені проміжки зберігають здатність деталі сприймати деформації без руйнування.

Отже, за сукупністю критеріїв - технологічна ефективність, локальність дії, мала деформація, збереження в'язкості основного металу, можливість автоматизації та придатність для складних форм - лазерне зміцнення є найбільш оптимальним способом підвищення довговічності робочих органів плуга ПЛН-5-35, який працює в умовах Полісся.

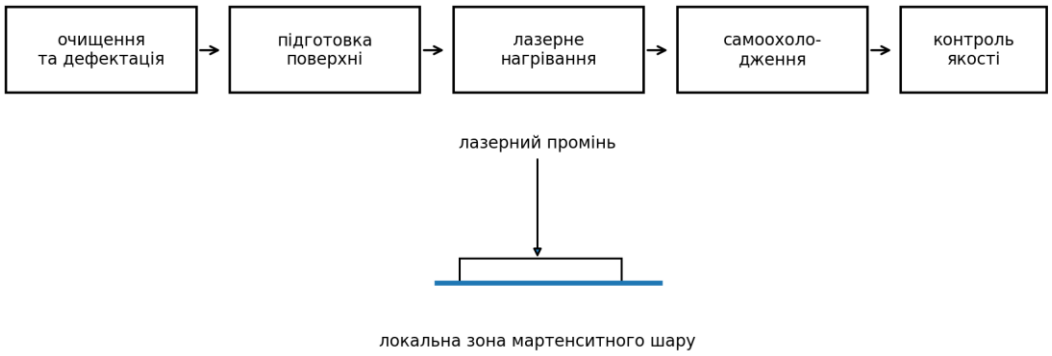


Рис. 2.4. Послідовність технологічного процесу лазерного зміцнення

2.6 Рекомендована технологічна схема лазерного зміцнення

Технологічний процес лазерного зміцнення робочих органів доцільно виконувати у такій послідовності: очищення деталі від ґрунту і корозії;

дефектація; знежирення поверхні; розмічання зміцнюваних зон; встановлення деталі на пристосування; лазерне сканування по заданій траєкторії; природне охолодження; контроль твердості, глибини шару і відсутності тріщин. Для деталей, що мають значний знос, перед зміцненням необхідно відновити геометрію або замінити їх, оскільки лазерна обробка не компенсує втрату розмірів.

Основними параметрами процесу є потужність лазера P, швидкість переміщення плями v, діаметр плями d, крок між доріжками s, ширина зміцненої смуги та кількість проходів. Для лемеша і багатогранного диска доцільно застосовувати режими, що забезпечують поверхневе гартування без оплавлення. Орієнтовно для сталевих робочих органів можна прийняти потужність 1,2-1,8 кВт, діаметр плями 3-4 мм, швидкість переміщення 10-18 мм/с, крок доріжок 4-6 мм. Остаточний режим уточнюється експериментально залежно від марки сталі, товщини деталі та стану поверхні.

Під час вибору траєкторії слід враховувати напрямок руху ґрунту по поверхні. На лемеші зміцнена смуга повинна проходити паралельно ріжучій кромці на відстані, яка забезпечує збереження гостроти леза і одночасно захищає зону максимального абразивного контакту. На носку лемеша доцільно виконати додаткове локальне зміцнення, оскільки саме ця зона першою входить у ґрунт. На відвалі зміцнюється нижня частина грудей, де нормальний тиск пласта найбільший.

Для багатогранного диска, запропонованого в удосконаленій конструкції плуга, лазерне зміцнення слід виконувати по робочих гранях. Таке рішення дозволяє зберегти гостроту кромки протягом тривалішого часу і підтримувати ефект попереднього розрізання дернини. Оскільки диск працює в режимі обертання, зміцнення повинно бути симетричним відносно осі, щоб не викликати дисбаланс. Після обробки необхідно перевірити биття диска та легкість обертання у підшипниковому вузлі.

Таблиця 2.4 – Рекомендовані параметри лазерного зміцнення робочих органів ПЛН-5-35

Робочий орган	Зміцнювана зона	Рекомендований режим	Очікуваний результат
Леміш	Носок і смуга вздовж ріжучої кромки шириною 20-30 мм	P = 1,2-1,8 кВт; v = 10-18 мм/с; d = 3-4 мм	Зменшення затуплення, збереження самозаглиблення
Відвал	Нижня частина грудей і зона найбільшого контакту з пластом	P = 1,0-1,6 кВт; v = 12-20 мм/с; переривчасті доріжки	Зменшення шорсткості та налипання, стабільне обертання пласта
Польова дошка	Робоча площина тертя зі стінкою борозни	P = 1,0-1,4 кВт; локальні доріжки в зоні контакту	Зменшення бокового зносу, стабільність ходу корпуса
Багатогранний диск	Ріжучі грані або периферійна кромка	P = 1,2-1,6 кВт; симетрична обробка граней	Стійке розрізання дернини та рослинних решток

2.7 Розрахункове оцінювання ефективності лазерного зміцнення

Ефективність зміцнення можна попередньо оцінити через зміну інтенсивності зношування та ресурсу робочого органа. Нехай граничне зношування ріжучої кромки лемеша, після якого погіршується якість оранки і різко зростає тяговий опір, становить $h_{гр}$ = 12 мм. Для базового незміцненого лемеша в умовах Полісся приймемо середню інтенсивність зношування i0 = 0,15 мм/га на один корпус. Тоді ресурс до граничного стану визначається за формулою:

$$T_0 = h_{гр} / i_0. \quad (2.1)$$

Підставляючи прийняті значення, отримаємо:

$$T_0 = 12 / 0{,}15 = 80 \text{ га}. \quad (2.2)$$

Для лазерно зміцненої кромки коефіцієнт підвищення зносостійкості приймемо $K_з$ = 1,8. Тоді інтенсивність зношування становитиме:

$$i_л = i_0 / K_з = 0,15 / 1,8 = 0,083 \text{ мм/га}. \quad (2.3)$$

Розрахунковий ресурс лемеша після лазерного зміцнення дорівнює:

$$T_л = h_{гр} / i_л = 12 / 0,083 = 145 \text{ га}. \quad (2.4)$$

Отже, очікуване збільшення ресурсу становить 145/80 = 1,81 раза, або близько 81 %. Для п'ятикорпусного плуга це означає зменшення кількості замін комплекту лемешів протягом сезону, скорочення простоїв і стабільнішу якість оранки. Наведений розрахунок є орієнтовним, але він демонструє принциповий ефект від локального підвищення твердості робочої кромки.

Додатковий ефект пов'язаний зі зниженням тягового опору. Затуплення ріжучої кромки може збільшувати опір оранці на 8-12 %. Для розрахунку приймемо базовий тяговий опір плуга R = 22,6 кН і збільшення через затуплення 10 %. Тоді додатковий опір становитиме ΔR = 2,26 кН. Якщо лазерне зміцнення дозволяє довше підтримувати гостроту кромки, ця надбавка виникає значно пізніше. За робочої швидкості v = 2,0 м/с економія потужності в період роботи зі зміцненими лемешами може бути оцінена так:

$$\Delta N = \Delta R \cdot v = 2,26 \cdot 2,0 = 4,52 \text{ кВт}. \quad (2.5)$$

За питомої витрати палива двигуна 0,25 кг/(кВт·год) орієнтовне зниження витрати палива у відповідний період становитиме 1,13 кг/год. Крім економії палива, важливим є надійнісний результат: менший опір зменшує навантаження на стійки, раму, кріплення корпусів і навісний механізм трактора. Таким чином, лазерне зміцнення робочих органів опосередковано підвищує надійність усього агрегату.

Оцінимо тривалість обробки комплекту лемешів. Якщо на одному лемеші виконується дві лазерні доріжки довжиною 0,35 м, то загальна довжина обробки для п'яти корпусів становить L = 2 · 0,35 · 5 = 3,5 м. За швидкості переміщення плями $v_л$ = 0,014 м/с машинний час обробки дорівнює:

$$t_м = L / v_л = 3,5 / 0,014 = 250 \text{ с} = 4,2 \text{ хв}. \quad (2.6)$$

З урахуванням установлення, розмічання і контролю фактичний час буде більшим, однак сам процес лазерної обробки залишається високопродуктивним. Це важливо для ремонтної майстерні, оскільки комплект

робочих органів можна зміцнювати до початку сезону без значних простоїв техніки.

Таблиця 2.5 – Розрахункова оцінка ефекту лазерного зміцнення лемешів

Показник	Базовий леміш	Лазерно зміцнений леміш
Граничне спрацювання кромки, мм	12	12
Інтенсивність зношування, мм/га	0,150	0,083
Розрахунковий ресурс, га	80	145
Відносний ресурс	1,00	1,81
Збереження гостроти кромки	Обмежене	Підвищене
Вплив на тяговий опір	Швидке зростання при затупленні	Повільніше зростання опору

2.8 Організація контролю якості та можливі обмеження методу

Щоб лазерне зміцнення забезпечило очікуваний ефект, необхідно організувати контроль якості обробки. Основними контрольованими параметрами є твердість поверхні, глибина зміцненого шару, відсутність тріщин, рівномірність доріжок і збереження геометрії ріжучої кромки. Контроль твердості може виконуватися переносним твердоміром або на зразках-свідках. Для уточнення глибини шару доцільно періодично виконувати металографічний контроль на контрольних зразках з аналогічного матеріалу.

Важливо не допустити оплавлення кромки. Оплавлення може утворити нерівну поверхню, збільшити шорсткість, створити концентратори напружень і порушити самозагострення. Також небажаним є перегрів тонких ділянок лемеша, тому потужність і швидкість переміщення мають підбиратися таким чином, щоб зона термічного впливу була обмеженою. Якщо на поверхні є глибока корозія, забруднення або залишки фарби, якість зміцнення знижується.

Обмеженням методу є потреба у спеціальному обладнанні та кваліфікованому операторі. Однак це обмеження можна компенсувати централізованою обробкою комплектів робочих органів у ремонтній майстерні або сервісному підрозділі. Для господарства важливо не обов'язково мати лазерну установку на кожному пункті технічного обслуговування, а

забезпечити доступ до технології перед початком польового сезону. Порівняно з частими замінами лемешів і простоями агрегату, така організація може бути економічно виправданою.

Після впровадження лазерного зміцнення необхідно вести облік наробітку робочих органів у гектарах і порівнювати фактичний ресурс зі звичайними деталями. До журналу доцільно заносити дату встановлення, площу обробленого поля, тип ґрунту, вологість, ознаки зношування та причини зняття деталі. Такий облік дозволить уточнити режими зміцнення і визначити, які зони потребують додаткової обробки.

Таблиця 2.6 – Контроль якості лазерно зміцнених робочих органів

Параметр контролю	Спосіб перевірки	Вимога або орієнтир
Твердість поверхні	Переносний твердомір або контрольний зразок	Орієнтовно 52-58 HRC для зміцнених зон
Глибина зміцненого шару	Металографічний контроль зразків	Близько 0,8-1,5 мм без оплавлення
Відсутність тріщин	Візуальний або капілярний контроль	Тріщини та відшарування не допускаються
Геометрія кромки	Шаблон, лінійка, візуальний огляд	Кромка не повинна мати напливів і перегріву
Рівномірність доріжок	Огляд траєкторії обробки	Без пропусків у зоні максимального контакту

Висновки по розділу

У другому розділі встановлено, що основними причинами втрати працездатності робочих органів плуга ПЛН-5-35 в умовах Полісся є абразивне, ударно-абразивне та корозійно-механічне зношування. Найбільш інтенсивно спрацьовуються носок і ріжуча кромка лемеша, груди та нижня частина відвала, робоча площина польової дошки, а також ріжучі грані багатогранного диска. Втрата геометрії цих деталей призводить до погіршення якості оранки, збільшення тягового опору, перевантаження корпусів і зниження надійності всього агрегату.

Порівняння існуючих способів зміцнення показало, що об'ємне гартування, наплавлення, індукційне і плазмове зміцнення мають певні

переваги, але не завжди оптимально відповідають умовам роботи тонких і складнопрофільних робочих органів плуга. Для умов Полісся важливо поєднати високу зносостійкість поверхні з достатньою ударною в'язкістю основи, мінімальними деформаціями і можливістю локальної обробки найбільш навантажених зон.

Найбільш доцільним способом обрано лазерне зміцнення. Воно забезпечує формування твердого поверхневого шару в зоні контакту з ґрунтом, зберігає в'язку серцевину деталі, дає змогу зміцнювати лезо лемеша, носок, груди відвала і грані багатогранного диска без значного порушення геометрії. Розрахункова оцінка показала, що при коефіцієнті підвищення зносостійкості 1,8 ресурс лемеша може зрости з 80 до 145 га, тобто приблизно в 1,8 раза.

Запропоноване лазерне зміцнення робочих органів доцільно поєднувати з конструктивним удосконаленням плуга шляхом встановлення багатогранного диска. Диск зменшує навантаження на корпуси завдяки попередньому розрізанню пласта, а лазерне зміцнення підтримує довговічність кромок і стабільність технологічного процесу. Така комбінація створює передумови для підвищення надійності ПЛН-5-35 у вологих, дернистих і абразивних умовах Полісся.

РОЗДІЛ 3
КОНСТРУКТИВНА РОЗРОБКА УДОСКОНАЛЕНОГО ПЛУГА ПЛН-5-35

3.1 Аналіз базової конструкції та обґрунтування модернізації

Плуг ПЛН-5-35 є навісним п’ятикорпусним лемішно-полицевим знаряддям для основного обробітку ґрунту. Його робоча ширина становить 1,75 м, оскільки кожний із п’яти корпусів захоплює смугу 0,35 м. Умови Полісся ускладнюють роботу такого плуга через підвищену вологість дерново-підзолистих ґрунтів, наявність рослинних решток, кореневих включень і неоднорідність опору на окремих ділянках поля. У базовій конструкції стінка борозни формується переважно розривом скиби, тому на леміш, полицю, стійку і болтові з’єднання діють змінні бокові та ударні навантаження.

Метою розробки є підвищення надійності ПЛН-5-35 шляхом встановлення перед корпусами багатогранних дисків. Диск виконує попередній вертикальний надріз дернини і рослинних решток у площині майбутньої стінки борозни. Після такого надрізу леміш підрізає пласт із меншим боковим зминанням, а полиця рівномірніше перевертає скибу. Це зменшує пікові навантаження на корпуси, знижує забивання міжкорпусного простору і створює передумови для збільшення ресурсу лемешів, польових дощок, стійок та елементів рами.

Багатогранна форма вибрана тому, що її робочі грані періодично самоврізаються у верхній шар ґрунту. На вологій дернині гладкий круглий ніж може ковзати, тоді як грань створює більший локальний тиск і надійніше перерізає корені та стерню. Водночас диск обертається від контакту з ґрунтом, тому додатковий тяговий опір залишається незначним порівняно з ефектом розвантаження корпусу.

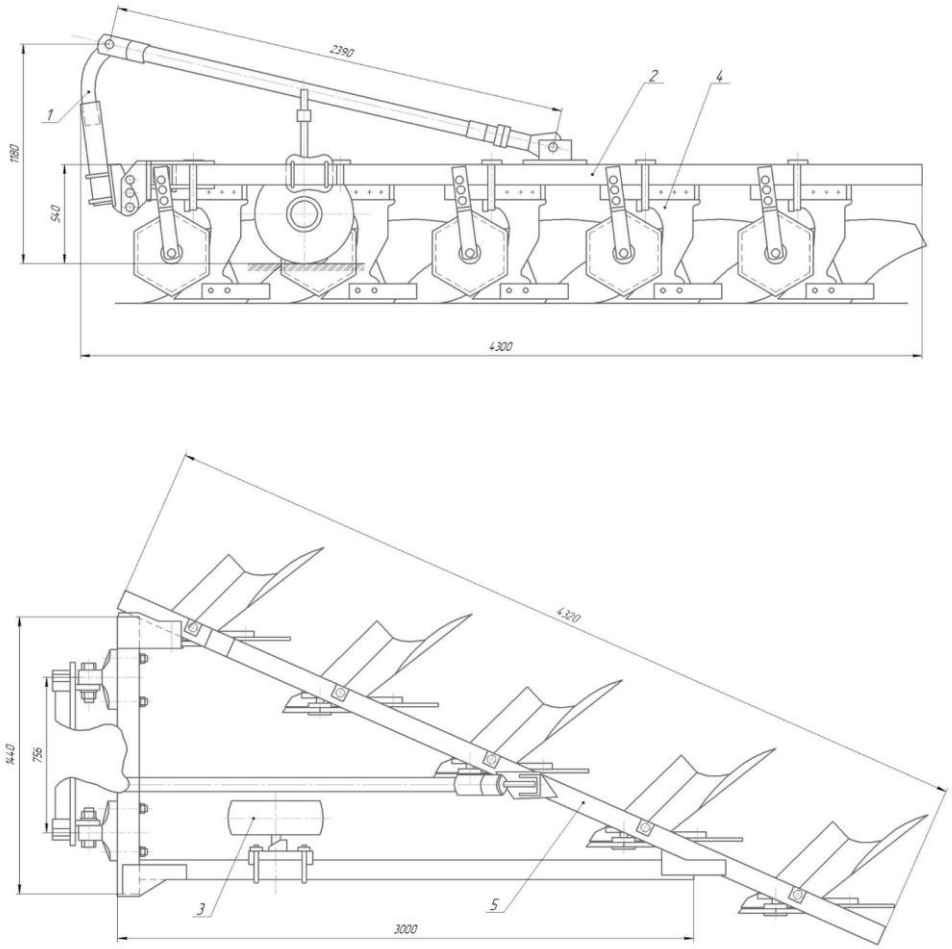


Рис. 3.1. Загальний вигляд плуга ПЛН-5-35 з установленими багатогранними дисками.

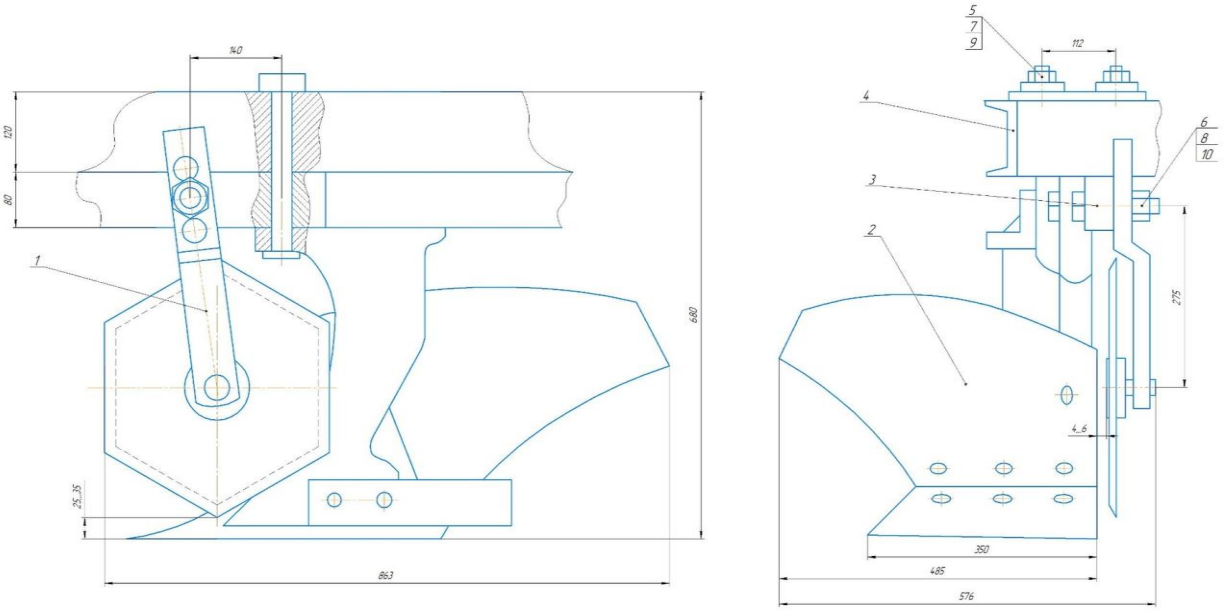


Рис. 3.2 . Вузол корпусу плуга з багатогранним диском

Таблиця 3.1 – Прийняті параметри модернізованого вузла.

Показник	Позначення	Значення
Кількість корпусів	n	5
Ширина захвату корпусу	b	0,35 м
Глибина оранки	a	0,22…0,25 м
Діаметр диска	$D_д$	0,45 м
Кількість граней	z	8
Товщина диска	t	6 мм
Робоче заглиблення диска	hд	0,10…0,16 м

3.2 Конструкція та технологічна схема роботи диска

Удосконалений вузол складається з диска, маточини з підшипниками, осі, регульованої стійки, притискних пластин і болтового кріплення. Диск розміщується перед носком лемеша та збоку від нього так, щоб площина різання збігалася з майбутньою вертикальною стінкою борозни. Стійка має ряд отворів, завдяки яким змінюють глибину входження диска у ґрунт без перероблення рами. Для нормальної оранки на 0,24 м приймають заглиблення 0,12…0,14 м; за великої кількості решток його збільшують до 0,16 м.

Технологічний процес відбувається послідовно: багатогранний диск перерізає дернину; леміш підрізає скибу знизу; полиця піднімає, кришить і перевертає пласт; польова дошка стабілізує положення корпусу у борозні. При цьому зменшується боковий розрив скиби перед лемешем, тому силовий режим корпусу стає рівномірнішим. Встановлення дисків особливо доцільне після багаторічних трав, кукурудзи, зернових із великою кількістю соломи та на перезволожених ділянках.

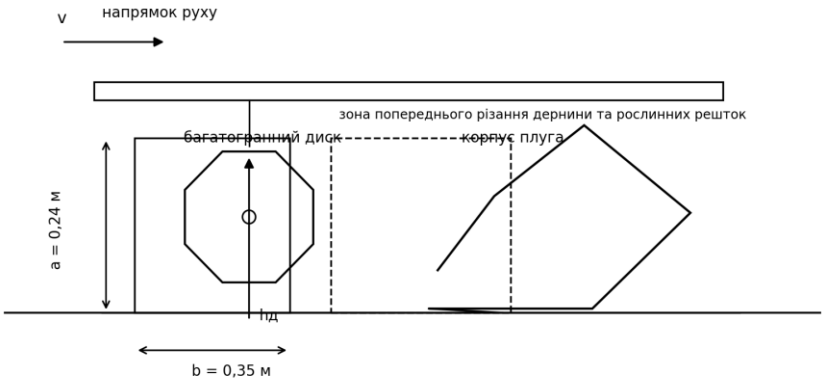


Рис. 3.3. Схема взаємодії багатогранного диска і корпусу плуга з ґрунтом

3.3 Розрахунок тягового опору

Розрахунок виконано для середніх умов Полісся. Прийнято: n = 5; b = 0,35 м; a = 0,24 м; робоча швидкість v = 2,0 м/с; питомий опір ґрунту k = 52 кН/м²; вага плуга G = 8,2 кН; коефіцієнт додаткового опору опорних елементів f = 0,08. Загальна ширина захвату:

$$B = n \cdot b = 5 \cdot 0{,}35 = 1{,}75\ м. \tag{3.1}$$

Тяговий опір базового плуга визначаємо як суму опору підрізання скиби та додаткового опору перекочування і заглиблення опорних елементів:

$$R_0 = k \cdot a \cdot B + f \cdot G = 52 \cdot 0{,}24 \cdot 1{,}75 + 0{,}08 \cdot 8{,}2 = 22{,}50\ кН. \tag{3.2}$$

Встановлення дисків зменшує роботу розриву та бокового зминання скиби. Для розрахунку приймаємо зниження опору корпусів на 10 %. Додатковий опір перекочування одного диска прийнято Fдт = 0,12 кН, оскільки диск вільно обертається на підшипниках.

$$R_к = R_0 \cdot (1 - 0{,}10) = 22{,}50 \cdot 0{,}90 = 20{,}25\ кН; \tag{3.3}$$

$$R_{д\Sigma} = n \cdot F_{дт} = 5 \cdot 0{,}12 = 0{,}60\ кН; \tag{3.4}$$

$$R_м = R_к + R_{д\Sigma} = 20{,}25 + 0{,}60 = 20{,}85\ кН. \tag{3.5}$$

$$\Delta R = R_0 - R_м = 1{,}65\ кН; \quad \delta = \Delta R / R_0 \cdot 100 = 7{,}3\ \%. \tag{3.6}$$

Економія потрібної потужності на гаку трактора за коефіцієнта передачі $\eta_{тр} = 0{,}80$ становить:

$$N_{ек} = \Delta R \cdot v / \eta_{тр} = 1{,}65 \cdot 2{,}0 / 0{,}80 = 4{,}13\ кВт. \tag{3.7}$$

Таблиця 3.2 – Порівняння силових показників

Показник	Базовий плуг	Плуг з дисками	Зміна
Сумарний тяговий опір, кН	22,50	20,85	−1,65
Опір на один корпус, кН	4,50	4,05	−0,45
Зниження тягового опору, %	-	7,3	-
Орієнтовна економія потужності, кВт	-	4,13	-

3.4 Розрахунок геометричних параметрів диска

Діаметр диска вибираємо з умови забезпечення робочого заглиблення і запасу для встановлення маточини. За $h_д$ = 0,14 м та запасу Δ = 0,05 м мінімальний діаметр дорівнює:

$$D_{д\,min} = 2 \cdot (h_д + Δ) = 2 \cdot (0{,}14 + 0{,}05) = 0{,}38\ м. \quad (3.8)$$

Приймаємо $D_д$ = 0,45 м. Такий розмір не збільшує суттєво габарити плуга і дозволяє отримати стабільний надріз дернини. Для восьмигранного диска орієнтовна довжина однієї грані:

$$l_{гр} = D_д \cdot \sin(π/z) = 0{,}45 \cdot \sin(π/8) = 0{,}172\ м. \quad (3.9)$$

Частота обертання за швидкості 2,0 м/с:

$$n_д = 60 \cdot v / (π \cdot D_д) = 60 \cdot 2{,}0 / (3{,}14 \cdot 0{,}45) = 84{,}9\ об/хв. \quad (3.10)$$

$$f_{гр} = z \cdot n_д / 60 = 8 \cdot 84{,}9 / 60 = 11{,}3\ Гц. \quad (3.11)$$

Отже, контакти граней із ґрунтом відбуваються достатньо часто для безперервного різання, але кожна кромка працює короткочасно. Товщина диска 6 мм прийнята з урахуванням міцності та технологічності. Для робочої кромки доцільно використовувати сталь 65Г або сталь 45 із зміцненням по периметру.

3.5 Міцнісний розрахунок осі, кронштейна і кріплення

Для міцнісної перевірки розглянуто випадок контакту диска з ущільненою ділянкою ґрунту або кореневою решткою. Приймаємо дотичну силу різання $F_д$ = 0,84 кН, вертикальну складову $Q_д$ = 1,20 кН. Рівнодійна сила, що передається на вісь і кронштейн:

$$R_д = \sqrt{(Fд^2 + Qд^2)} = \sqrt{(0{,}84^2 + 1{,}20^2)} = 1{,}46\ кН. \quad (3.12)$$

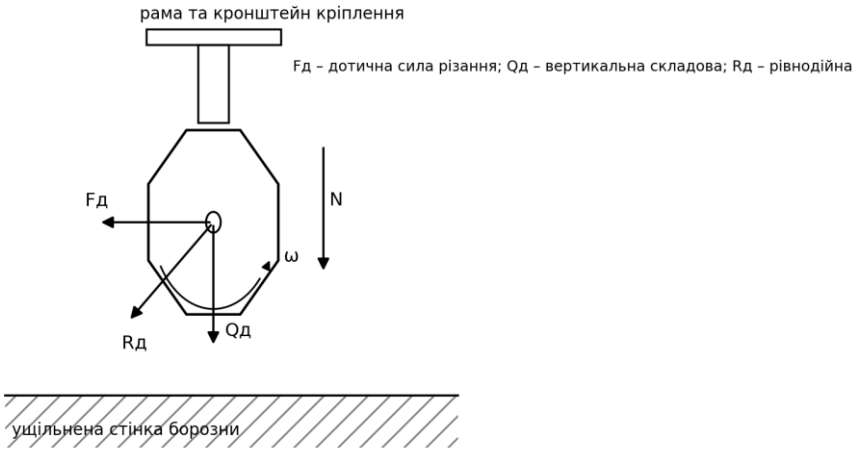


Рис. 3.4. Розрахункова схема сил, що діють на багатогранний диск.

За відстані від площини диска до опори l = 50 мм згинальний момент на осі становить M = 1,46·10³·50 = 73 000 Н·мм. Для осі діаметром d = 22 мм напруження згину дорівнює:

$$\sigma = 32 \cdot M / (\pi \cdot d^3) = 32 \cdot 73\,000 / (3{,}14 \cdot 22^3) = 69{,}9\ МПа. \quad (3.13)$$

Для сталі 45 приймаємо допустиме напруження [σ] = 160 МПа. Коефіцієнт запасу міцності nσ = 160/69,9 = 2,29, що є достатнім для польових умов. Болтове кріплення перевіряємо за зсувом для двох болтів М12 з розрахунковим діаметром d0 = 10,2 мм:

$$\tau_б = 1460 / (2 \cdot 3{,}14 \cdot 10{,}2^2/4) = 8{,}9\ МПа < [\tau] = 90\ МПа. \quad (3.14)$$

Якщо кронштейн виготовлено зварним, два кутові шви довжиною 80 мм і катетом 4 мм сприймають напруження τш = 3,2 МПа, що значно менше допустимого. Тому основною вимогою є не статична міцність, а жорсткість стійки, надійна фіксація регулювальних отворів і захист підшипникового вузла від абразивного пилу та вологи.

Таблиця 3.3 – Результати перевірочних розрахунків

Елемент	Параметр	Отримано	Допустимо	Висновок
Вісь	σ, МПа	69,9	160	запас 2,29
Болти М12	τ, МПа	8,9	90	достатньо
Зварні шви	τ, МПа	3,2	110	достатньо
Підшипник	P, кН	1,46	C = 14 кН	допустимо

3.6 Розрахунок довговічності та вплив на надійність

Для маточини диска приймаємо радіальний кульковий підшипник із динамічною вантажопідйомністю C = 14 кН. Еквівалентне навантаження P = 1,46 кН. Для кулькових підшипників p = 3:

$$L_{10} = (C/P)^3 = (14/1{,}46)^3 = 882\ млн\ обертів. \quad (3.14)$$

$$L_{10h} = 882 \cdot 10^6 / (60 \cdot 84{,}9) = 173\,100\ год. \quad (3.15)$$

Розрахункова довговічність підшипника значно перевищує сезонну напрацювання, тому фактичний ресурс визначатиметься якістю ущільнення, мащення і захистом від корозії. У польових умовах Полісся необхідно

застосовувати закриту маточину, періодично поповнювати мастило та контролювати люфт.

Зниження навантаження на корпуси на 10 % позитивно впливає на втомну довговічність стійок і кріплень. За орієнтовною залежністю пошкодження від навантаження з показником m = 3:

$$D_м/D_0 = (P_м/P_0)^3 = 0{,}90^3 = 0{,}729. \quad (3.16)$$

Отже, накопичення пошкоджень у навантажених деталях може зменшитися приблизно на 27 %. Якщо інтенсивність відмов вузлів корпусу зменшиться на 20 %, то для сезонної напрацювання 600 год і $\lambda_0 = 0{,}00042$ год$^{-1}$ імовірність безвідмовної роботи зміниться з $P_0 = e^{(-0{,}00042 \cdot 600)} = 0{,}777$ до $P_м = e^{(-0{,}000336 \cdot 600)} = 0{,}817$. Це підтверджує, що модернізація спрямована не лише на якість оранки, а й на підвищення надійності плуга як системи.

3.7 Регулювання та технічне обслуговування

Перед початком роботи перевіряють обертання диска, відсутність осьового люфту, затягування болтів і положення площини різання відносно польового обрізу корпусу. Площина диска повинна бути практично паралельною напрямку руху; відхилення понад 2…3° збільшує опір і може спричинити бокове відведення плуга. Після перших двох годин роботи болти кронштейна повторно підтягують, оскільки притискні пластини можуть осісти під дією вібрації.

Глибину $h_д$ встановлюють залежно від умов поля. На легких ґрунтах достатньо 0,10…0,12 м, на дернині та за великої кількості соломи – 0,14…0,16 м. Якщо скиба залишається не перерізаною, диск опускають або зміщують ближче до стінки борозни. Якщо зростає буксування трактора і помітне надмірне подрібнення верхнього шару, диск піднімають на один отвір.

Таблиця 3.4 – Регулювання і технічне обслуговування дисків

Операція	Періодичність	Норма	Дія при відхиленні
Обертання диска	перед зміною	без заїдань	очистити, змастити
Люфт маточини	20 год	не відчувається	підтягнути або замінити підшипник
Болти кронштейна	40 год	зміщення відсутнє	підтягнути, встановити шайби
Глибина hд	за умов поля	0,10…0,16 м	переставити стійку
Робочі грані	після зміни	без тріщин	заточити або замінити диск

Висновки по розділу

У розділі запропоновано конструктивне удосконалення плуга ПЛН-5-35 шляхом встановлення перед корпусами багатогранних дисків. Вузол забезпечує попереднє різання дернини і рослинних решток, зменшує бокове зминання скиби та стабілізує роботу корпусів на вологих і задернілих ґрунтах Полісся.

Розрахунки показали, що сумарний тяговий опір зменшується з 22,50 до 20,85 кН, тобто на 7,3 %, а навантаження на один корпус – приблизно на 10 %. Міцнісна перевірка осі, болтів, зварних швів і підшипника підтвердила працездатність запропонованої конструкції. Очікуваний результат модернізації полягає у підвищенні якості оранки, зменшенні забивання робочих органів, економії потужності близько 4 кВт і збільшенні ресурсу навантажених елементів плуга.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання підвищення надійності п’ятикорпусного плуга ПЛН-5-35 під час його експлуатації в умовах Полісся. Актуальність обраної теми зумовлена тим, що основний обробіток ґрунту є однією з найбільш енергоємних технологічних операцій у сільськогосподарському виробництві, а надійність ґрунтообробних машин безпосередньо впливає на якість оранки, своєчасність виконання польових робіт, витрати палива, ремонтні витрати та загальну ефективність використання машинно-тракторного парку.

У першому розділі було проаналізовано сучасний стан експлуатації ґрунтообробних машин і визначено основні напрями підвищення їх надійності. Встановлено, що плуг ПЛН-5-35 належить до поширених машин для основного обробітку ґрунту, однак під час роботи в умовах Полісся його робочі органи зазнають значного абразивного зношування. Це пояснюється переважанням дерново-підзолистих, супіщаних і піщаних ґрунтів, підвищеною вологістю, неоднорідністю орного шару та наявністю рослинних решток. Найбільш інтенсивно зношуються лемеші, полиці, польові дошки, дискові ножі та елементи кріплення, що призводить до зміни геометричних параметрів робочих органів, зростання тягового опору, погіршення кришення і перевертання скиби.

У другому розділі було досліджено причини та умови втрати працездатності робочих органів плуга ПЛН-5-35. Встановлено, що основними чинниками зношування є абразивна дія частинок ґрунту, ударні навантаження, корозійно-механічний вплив вологого середовища, нерівномірне навантаження корпусів і порушення режимів експлуатації. Проведений аналіз існуючих способів зміцнення показав, що наплавлення, цементація, борування, гартування струмами високої частоти та інші методи мають певні переваги, проте не завжди забезпечують оптимальне поєднання твердості, зносостійкості, точності обробки та збереження геометрії деталей. Для умов Полісся найбільш доцільним способом підвищення довговічності робочих органів обґрунтовано

лазерне зміцнення, яке дозволяє локально підвищити твердість поверхневого шару, зменшити інтенсивність зношування та зберегти основні розміри деталей.

У конструктивній частині роботи запропоновано удосконалення плуга ПЛН-5-35 шляхом встановлення багатогранного диска. Запропонований диск покращує підрізання ґрунтового шару, сприяє кращому розділенню скиби перед її надходженням на корпус плуга, зменшує навантаження на лемішно-полицеву поверхню та підвищує стабільність технологічного процесу оранки. Виконані інженерні розрахунки підтвердили працездатність удосконаленої конструкції, достатню міцність основних елементів кріплення та можливість її використання без суттєвої зміни базової конструкції плуга. Це дає змогу модернізувати наявні плуги ПЛН-5-35 у господарствах без значних капітальних витрат.

У результаті виконаної роботи встановлено, що комплексне поєднання конструктивного удосконалення плуга та зміцнення його робочих органів є ефективним напрямом підвищення надійності ґрунтообробної машини. Встановлення багатогранного диска дозволяє знизити навантаження на корпуси, покращити якість виконання технологічної операції та зменшити ймовірність передчасного виходу робочих органів з ладу. Застосування лазерного зміцнення сприяє підвищенню ресурсу деталей, зменшенню кількості замін лемешів і полиць, скороченню простоїв агрегату та зниженню витрат на ремонтно-обслуговувальні роботи.

Практичне значення роботи полягає в тому, що запропоновані технічні рішення можуть бути використані в сільськогосподарських підприємствах Поліської зони для модернізації плугів ПЛН-5-35. Їх впровадження дозволить підвищити експлуатаційну надійність плуга, забезпечити стабільну якість оранки, зменшити енерговитрати та підвищити ефективність використання машинно-тракторного парку. Отже, поставлена мета роботи досягнута, а запропоновані рішення є технічно обґрунтованими та доцільними для практичного застосування в умовах Полісся.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zum Gahr K. H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam : Elsevier, 1987. 560 p.

2. Steen W. M., Mazumder J. Laser Material Processing. 4th ed. London : Springer, 2010. 558 p.

3. Ready J. F., Farson D. F. LIA Handbook of Laser Materials Processing. Orlando : Laser Institute of America, 2001. 715 p.

4. Ion J. C. Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application. Oxford : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. 576 p.

5. Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. Laser Cladding. Boca Raton : CRC Press, 2005. 280 p.

6. ASTM G65-16. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. West Conshohocken : ASTM International, 2016.

7. Борак К. В. Комплексний підхід підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин : дис. … д-ра. техн. наук : 05.05.11 / Поліський національний університет, м. Житомир. 2021. 380.

8. Борак К. В. Impact of soil moisture on wear intensity of the actuating elements of soil processing machines. Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології». 2020. № 2. С 34–41.

9. Борак К. В. Impact of soil moisture on wear intensity of the actuating elements of soil processing machines. Проблеми трибології. 2020. № 2. С 34–41.

10. Rogovskii, I. L., Borak, K. V., Maksimovich, E. Yu., Smelik, V. A., Voinash, S. A., Maksimovich, K. Yu., & Sokolova, V. A. (2020). Wear resistance of blade and disc working bodies of tillage tilling machines hardened by electrodes. T-series. Journal of Physics : Conference Series. 1679 (4), art. №. 042084.

11. Надикто В. Т. Основи наукових досліджень : підручник. Херсон : Олді-плюс, 2017. 268 с.

12. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Калетнік Г. М. Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва. Київ : Аграрна наука, 2013. 576 с.

13. Войтюк Д. Г., Гаврилюк Г. Р. Сільськогосподарські машини : підручник. Київ : Каравела, 2018. 552 с.

14. Войтюк Д. Г., Барановський В. М., Булгаков В. М. Сільськогосподарські та меліоративні машини. Київ : Вища освіта, 2004. 544 с.

15. Кравчук В. І., Погорілий Л. В., Новохацький М. Л. Техніка для обробітку ґрунту та сівби : навч. посіб. Дослідницьке : УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, 2009. 288 с.

16. Погорілий Л. В., Коваль С. М. Випробування сільськогосподарської техніки : наук.-метод. основи оцінювання та прогнозування надійності. Київ : Фенікс, 2004. 208 с.

17. Бабич А. О., Сайко В. Ф. Землеробство : підручник. Київ : Урожай, 2010. 464 с.

18. Заєць М. Л. Вплив параметрів дискових сошників на передавальну здатність прорізання пожнивних решток у системі нульового обробітку ґрунту. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 2023 Вип. 53. С. 16-22.

19. Заєць М. Л. Переваги технології вертикального обробітку ґрунту/ М. Л. Заєць, К. В. Гусаров // Наукові читання–2021: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 20 травня 2021 р. Житомир: Поліський національний університет, 2021. С. 52-55.

20. Гевко Б. М., Рогатинський Р. М. Технологічні основи проектування та виготовлення сільськогосподарських машин. Тернопіль : ТДТУ, 2005. 320 с.

21. Березовий М. Г., Корнієнко С. І. Надійність сільськогосподарської техніки : навч. посіб. Харків : ХНТУСГ, 2016. 246 с.

22. Кузьмінський Р. Д., Шевчук Р. С. Ремонт машин і обладнання агропромислового комплексу : навч. посіб. Львів : ЛНАУ, 2015. 328 с.

23. Борак К. В., Куликівський В. Л. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів. Ч. 1: Теоретичні основи матеріалознавства : навч. посіб. Житомир : Поліський нац. ун-т, 2024. 101 с.