

УДК 631.33.024.2:621.791.763 DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.128-134>

Ю. В. Мачок, доц., канд. техн. наук, Д. І. Петренко, доц., канд. техн. наук,
Д. Ю. Артеменко, доц., канд. техн. наук, Р. В. Кісільов, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: machokuv@ukr.net

Проектний інжиніринг та надійність грунторізальних елементів полозкових сошників зернових сівалок

У статті розглянуто методологічні засади проектного інжинірингу та системного забезпечення надійності вертикально орієнтованих грунторізальних елементів полозкових сошників зернових сівалок в умовах абразивного зношування. На основі сучасних підходів до трибологічного моделювання та методів прогнозування залишкового ресурсу визначено ключові параметри, що забезпечують ефект самозагострювання леза завдяки нанесенню композиційних кераміко-металевих покриттів контактним наварюванням. Запропоновано мультикритеріальну модель оцінювання надійності з урахуванням фізико-механічних властивостей покриттів, динаміки зносу та тягового опору сошника. Результати чисельного моделювання та натурних випробувань підтверджують підвищення ресурсу зміцнених полозів у 2,1...2,4 рази порівняно зі стандартними.

проектний інжиніринг, надійність, грунторізальний елемент, полозковий сошник, абразивне зношування, кераміко-металеve покриття, самозагострювання, ресурс

Постановка проблеми. Сучасний рівень розвитку сільськогосподарського машинобудування висуває принципово нові вимоги до методів проектування та забезпечення надійності робочих органів посівних машин з використанням передових підходів системного аналізу, цифрового моделювання та управління якістю, що в сукупності формують науково обґрунтований інструментарій для створення конкурентоспроможної техніки [1, 2].

Грунторізальні елементи полозкових сошників зернових сівалок функціонують в умовах інтенсивного абразивного зношування, циклічних динамічних навантажень і агресивного ґрунтового середовища. Досвід виробників свідчить, що ресурс леза стандартних полозів зі сталі 65Г становить 80...120 га, тоді як сучасні агротехнічні вимоги орієнтують на щонайменше 200...250 га без технічного обслуговування [3]. Існуюча розбіжність між нормативним і фактичним ресурсом зумовлює необхідність розробки нових підходів у рамках проектного інжинірингу – від обґрунтування конструктивних параметрів до вибору матеріалів і технологій зміцнення.

Метою статті є розробка науково обґрунтованої методології проектного інжинірингу та прогнозування надійності вертикально орієнтованих грунторізальних елементів полозкових сошників з урахуванням ефекту самозагострювання леза, зміцненого композиційними кераміко-металевими покриттями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика підвищення надійності та довговічності робочих органів ґрунтообробних і посівних машин є предметом поглиблених досліджень як в Україні, так і за кордоном. У підручнику

Войтюка Д.Г. та співавторів [4] систематизовано будову і теорію розрахунку сільськогосподарських машин, зокрема посівних, що є базисом для аналізу надійності їх робочих органів. Навчальний посібник Сала В.М., Лещенка С.М. та ін. [5] містить детальний аналіз конструкцій сошників і є сучасним практичним орієнтиром для проєктування посівних машин з урахуванням агротехнічних вимог.

Зарубіжні дослідники Khurmi R.S. та Gupta J.K. [6] розглядають забезпечення надійності машинних систем як інтегральну частину машинобудівного проєктування, вказуючи на необхідність врахування стохастичного характеру навантажень у трибологічних парах «метал-абразивне середовище». Актуальні підходи до трибологічного проєктування деталей машин, включаючи моделі ARCHARD і розширені моделі зносу для умов абразивного середовища, розглянуто в роботах Mang T. та Dresel W. [7].

Питання підвищення довговічності робочих органів посівних і ґрунтообробних машин шляхом нанесення зносостійких покриттів досліджено Денисенком М.І. та Опальчуком А.С. [9], де показано, що зміцнення евтектичними та композиційними покриттями підвищує зносостійкість у 1,96...2,5 рази порівняно з серійними деталями зі сталі 65Г. Взаємозв'язок між мікроструктурою, твердістю та зносостійкістю кераміко-металевих сплавів на основі Co-TiC і Ni-TiC ретельно досліджено Черепова Т. та ін. [10] – встановлено, що зміцнення карбідом титану суттєво підвищує опір абразивному зносу. Власні дослідження автора та колег [12, 14, 15] підтверджують ресурсний потенціал зміцнених сошників та обґрунтовують доцільність усунення загострення лез при їх проєктуванні.

Разом із тим, системний аналіз публікацій виявляє дефіцит досліджень, присвячених комплексному проєктно-інжиніринговому підходу до забезпечення надійності саме полозкових сошників тих конструкцій, що поєднують вертикально орієнтоване лезо із специфічним силовим навантаженням, відмінним від дискових і наральникових аналогів.

Постановка завдання. Мета роботи – розробка методологічного забезпечення проєктного інжинірингу ґрунторізальних елементів полозкових сошників сівалок на основі мультикритеріальної оцінки надійності, трибологічного моделювання та верифікації ресурсних прогнозів за результатами натурних випробувань.

Матеріали і методи. Методологічну основу дослідження формують: системний підхід до проєктування надійних машин (стандарти ДСТУ ISO 9001:2015, ДСТУ EN 13306:2018); імітаційне моделювання зносу за допомогою MCE-паketу ANSYS Mechanical; аналітичні моделі трибологічної взаємодії «метал-абразив»; фізичний експеримент з метрологічним контролем лінійного зносу профілю леза (мікрометричний і профілометричний методи); математико-статистичне опрацювання результатів (метод найменших квадратів, критерій Стюдента).

Об'єктом дослідження слугував полозковий сошник зернової сівалки ЗС-3,6 з вертикально орієнтованим лезом. Варіанти виконання – базовий (сталь 65Г, загартування до 40 HRC) та зміцнений (контактне наварювання кераміко-металевої стрічки WC-Ni-Fe на лезо товщиною зміцнення 0,8...1,2 мм). Польові випробування проводились на ґрунтах суглинкового механічного складу (вміст фізичного піску 38...52 %, твердість за конусним пенетрометром 1,2...2,1 МПа) у Центральному регіоні України.

Виклад основного матеріалу. У контексті проєктного інжинірингу процес розробки ґрунторізального елемента розглядається як ітераційний цикл: «аналіз відмов → параметрична оптимізація → вибір матеріалу → технологія зміцнення → верифікація ресурсу». Ключовими показниками надійності при цьому виступають:

безвідмовність (функція розподілу відмов $F(t)$); ремонтпридатність (середній час відновлення MTTR); довговічність (призначений ресурс T_p); збереженість (коефіцієнт збереження $k_{зб}$ [1, 2].

Аналіз статистичних даних відмов полозкових сошників ($n=86$ зразків) [3], підтверджує, що 74,4 % відмов обумовлені зносом леза до граничного стану (збільшення радіусу закруглення різальної кромки понад 3,5 мм), 15,1 % – поломкою тіла полозу внаслідок ударного навантаження, 10,5 % – іншими причинами. Відповідно, підвищення зносостійкості леза є головним резервом збільшення ресурсу сошника як функціонального елемента.

Проектний інжиніринг передбачає на першому етапі формалізацію вимог до надійності у вигляді технічного завдання: призначений ресурс $T_p \geq 200$ га; допустиме збільшення тягового опору $\Delta P \leq 15$ % від номінального; максимальний радіус леза $r_{\max} \leq 3$ мм. Ці вимоги задають межі варіювання конструктивних (кут заточування α , товщина зміцненого шару h) та матеріальних (твердість зміцненого шару H_s , пластичність основи H_0) параметрів [1, 5].

Відмітною особливістю вертикально орієнтованого леза є несиметричне навантаження: бічна (латеральна) складова абразивного тиску суттєво перевищує нормальну для горизонтальних аналогів. МСЕ-моделювання (ANSYS Mechanical 2023 R1, сітка 0,15 мм в зоні контакту) виявило, що максимальні еквівалентні напруження за Мізесом у вершині леза досягають 820...960 МПа при стандартному радіусі 1,0 мм, що перевищує границю текучості сталі 65Г ($\sigma_T = 785$ МПа). Це пояснює прискорений пластичний знос вершини в початковий період напрацювання (0...30 га).

Для опису динаміки зміни профілю леза адаптовано узагальнену модель зносу [7, 8]:

$$\frac{dh}{dt} = k \cdot p^n \cdot v^m \cdot f(\varphi),$$

де $\frac{dh}{dt}$ – лінійна швидкість зносу, мм/га; k – коефіцієнт зносостійкості матеріалу; p – контактний тиск абразиву, МПа; v – швидкість агрегату, м/с; n , m – емпіричні показники; $f(\varphi)$ – функція кута атаки абразивних частинок, що враховує анізотропію зношування по висоті леза.

Параметри моделі ідентифіковано за результатами лабораторних випробувань на стенді прискореного зношування (абразив – кварцовий пісок фракції 0,25...1,0 мм): для сталі 65Г $n=0,72$, $m=0,81$, $k=0,0148 \text{ мм} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{МПа}^{-n}$; для зміцнюючого покриття WC–Ni–Fe $k_s=0,0061 \text{ мм} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{МПа}^{-n}$ – у 2,4 рази нижче.

Верифікація моделі за натурними даними (38 пар вимірювань) показала задовільну точність: коефіцієнт кореляції $r=0,924$, відносна похибка $\delta \leq 12,3$ в діапазоні 0...220 га. Це засвідчує ефективність застосування моделі для ресурсного прогнозування в інжинірингу життєвого циклу виробу.

Ефект самозагострювання леза є фундаментальним принципом, що лежить в основі підвищення ресурсу зміцнених полозів. Він реалізується внаслідок диференційованого зношування двошарового поперечного перерізу: м'якша основа

зношується інтенсивніше, ніж твердий зміцнений шар, що спричиняє безперервне самовідновлення гострого кута леза в процесі роботи [3, 10].

Аналітична умова реалізації ефекту самозагострювання формулюється наступним чином. Необхідно, щоб відношення інтенсивностей зношування зміцненого та базового шарів задовольняло нерівність:

$$\frac{I_o}{I_z} \geq \frac{\operatorname{tg} \alpha_0}{\operatorname{tg} \alpha_{zp}},$$

де I_o , I_z – відповідно інтенсивності зношування основного та зміцненого шарів; α_0 – початковий кут заточування леза; α_{zp} – граничний кут, при якому якість борозноутворення є допустимою ($\alpha_{zp} \leq 35^\circ$ [3, 5]).

Для запропонованої пари WC–Ni–Fe – сталь 65Г визначено $\frac{I_o}{I_z} = 3,8 \dots 4,1$ (залежно від механічного складу ґрунту), що забезпечує стабілізований кут $\alpha = 22^\circ \dots 27^\circ$ протягом усього ресурсного періоду. Порівняно зі стандартним полозом, де кут леза деградує з 15° до 55° вже при 80 га, зміцнена конструкція зберігає $\alpha < 30^\circ$ до 210...230 га.

У рамках проєктного інжинірингу надійність ґрунторізального елемента оцінюється за мультикритеріальним показником Q , що інтегрує кілька аспектів:

$$Q = w_1 \cdot R(T_p) + w_2 \cdot \left(1 - \frac{\Delta P}{\Delta P_{\max}}\right) + w_3 \cdot \left(1 - \frac{r}{r_{\max}}\right),$$

де $R(T_p)$ – ймовірність безвідмовної роботи при призначеному ресурсі T_p ; $\frac{\Delta P}{\Delta P_{\max}}$ –

відносне збільшення тягового опору; $\frac{r}{r_{\max}}$ – відносний радіус леза; w_1 , w_2 , w_3 – вагові коефіцієнти ($w_1 = 0,50$, $w_2 = 0,30$, $w_3 = 0,20$), встановлені за методом ієрархічного аналізу АНР [11].

Для закону розподілу часу до відмови обрано закон Вейбулла-Гнєденка (підтверджено критерієм Колмогорова-Смірнова при рівні значущості 0,05):

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\tau} \right)^\beta \right],$$

де β – параметр форми; η – масштабний параметр (характеристичний ресурс). Для базового полозу $\beta = 2,14$, $\eta = 98$ га; для зміцненого – $\beta = 2,67$, $\eta = 221$ га. Зростання β свідчить про більш детерміновану природу відмов зміцненого варіанта, що є позитивним з точки зору передбачуваності технічного обслуговування.

Розраховані значення мультикритеріального показника надійності: $Q_{\text{баз}} = 0,54$; $Q_{\text{зм}} = 0,83$. Приріст показника (+29, або 53,7%) підтверджує ефективність запропонованого конструктивно-технологічного рішення в термінах проєктного інжинірингу.

Зниження тягового опору є важливим наслідком ефекту самозагострювання. Експериментальні дані (тензометричний метод, польові умови, трактор МТЗ-82, $v = 8 \dots 9$ км/год) засвідчили, що тяговий опір зміцненого сошника при напрацюванні 150 га складає $P_s = 0,48$ кН, тоді як базового – $P_o = 0,74$ кН, тобто на 35,1% менший. У перерахунку на агрегат з 24 сошниками за сезон економія пального становить 4,2...5,1 л/га, що є суттєвим економічним аргументом на користь технічного рішення [3, 12].

На основі проведеного дослідження сформульовано наступні рекомендації для проєктантів і технологів:

- на стадії ескізного проєктування реалізовувати МСЕ-аналіз напружено-деформованого стану леза для профілів з кутом заточування $\alpha = 15^\circ \dots 20^\circ$ і встановлювати зони обов'язкового зміцнення;
- при виборі матеріалу покриття пріоритетним критерієм вважати відношення $\frac{I_0}{I_s} \geq 3,5$ за умови задовільної адгезійної міцності ($\tau_{\text{адг}} \geq 120$ МПа за ДСТУ 2639-94);
- товщину зміцненого шару призначати $h = 0,8 \dots 1,2$ мм; збільшення понад 1,5 мм погіршує пластичність зони стику і збільшує ризик когезійного розшарування при ударному навантаженні;
- для прогнозування ресурсу на етапі технічного завдання застосовувати параметри закону Вейбулла, ідентифіковані за результатами прискорених стендових випробувань (не менше 20 зразків кожного варіанту);
- мультикритеріальний показник $Q \geq 0,80$ вважати цільовим при проєктуванні, що відповідає ймовірності безвідмовної роботи $R(T_p) \geq 0,90$ при $T_p = 200$ га.

Висновки. 1. Розроблено методологію проєктного інжинірингу ґрунторізальних елементів полозкових сошників зернових сівалок, яка базується на мультикритеріальній оцінці надійності, трибологічному МСЕ-моделюванні та ресурсному прогнозуванні за законом Вейбулла–Гнєденка.

2. Ідентифіковано параметри трибологічної моделі зношування вертикально орієнтованих лез для пари «WC–Ni–Fe покриття – сталь 65Г»: коефіцієнт зносостійкості k_s у 2,43 рази менший за базовий матеріал, що забезпечує реалізацію ефекту самозагострювання ($\frac{I_0}{I_s} = 3,8 \dots 4,1$) і стабілізацію кута леза $\alpha = 22^\circ \dots 27^\circ$ до напрацювання 210...230 га.

3. Розрахунковий та експериментальний ресурс зміцнених полозів становить 210...230 га, що в 2,1...2,4 рази перевищує ресурс базових полозів (98...108 га). Мультикритеріальний показник надійності Q зріс з 0,54 до 0,83.

4. Тяговий опір зміцненого сошника при напрацюванні 150 га на 35,1% нижчий за базовий, що забезпечує економію 4,2...5,1 л/га дизельного пального та підтверджує енергетичну ефективність рішення.

5. Розроблені методологічні засади можуть бути застосовані при проєктуванні й інших різальних та ґрунторізальних елементів посівних і ґрунтообробних машин.

Список літератури

1. Павлище В.Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин: підручник. 2-ге вид. Львів: Афіша, 2003. 560 с.
2. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О. Теорія технічних систем: навч. посіб. Київ: ЦП «КОМПРИНТ», 2017. 291 с.
3. Мачок Ю.В., Солових Є.К. Підвищення довговічності ґрунторізальних елементів полозкових сошників зернових сіялок зносостійкими покриттями. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2012. Вип. 42, ч. 1. С. 176–183.
4. Войтюк Д.Г., Аніскевич Л.В., Барановський В.М. та ін.; за ред. Д.Г. Войтюка. Сільськогосподарські машини: підручник. Київ: Агроосвіта, 2015. 679 с.
5. Машини для сівби, садіння та догляду за посівами: навч. посіб. / Сало В.М., Лещенко С.М., Лузан П.Г., Сало Л.В. Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2022. 220 с. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/12307>.
6. Khurmi R.S., Gupta J.K. *Theory of Machines*. 15th ed. New Delhi: S. Chand & Company, 2020. 1062 p.
7. Mang T., Dresel W. (eds.) *Lubricants and Lubrication*. 3rd ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2017. 892 p.
8. Сало В.М., Богатирьов Д.В., Лещенко С.М. Щодо надійності технологічного процесу подрібнення пожнивних решток. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2023. Вип. 53. С. 93–101. DOI: 10.32515/2414-3820.2023.53.93-101.
9. Денисенко М.І., Опальчук А.С. Підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних, кормозбиральних та посівних машин. *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2015. Вип. 212/1. С. 52–61.
10. Research on the properties of Co-TiC and Ni-TiC HIP-sintered alloys./ Cherepova T., Dmitrieva G., Tisov O., Dukhota O., Kindrachuk M. *Acta Mechanica et Automatica*. 2019. Vol. 13, № 1. P. 57–67. DOI: 10.2478/ama-2019-0009.
11. Saaty T.L. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*. 2008. Vol. 1, № 1. P. 83–98. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.
12. Амосов В.В., Мачок Ю.В., Дейкун В.А. Підвищення довговічності сошників сіялок. *Abstracts of XXV International Scientific and Practical Conference (June 26–28, 2023)*. Warsaw, Poland. С. 38–40.
13. Шмат С.І., Лузан П.Г., Сало В.М. Покращення якісних показників процесу сівби. *Сільськогосподарські машини*. 2024. Вип. 50. С. 113–119.
14. Дейкун В.А., Жук Д.Г., Мачок Ю.В. Огляд способів внесення та ефективності застосування мінеральних добрив. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2022. Вип. 52. С. 41–47. DOI: 10.32515/2414-3820.2022.52.41-47.
15. Мачок Ю.В., Сало В.М., Лузан П.Г. Про доцільність загострення лез ґрунтообробних та посівних машин. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції»*. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. С. 54–56.

References

1. Pavlyshche, V.T. (2003). *Fundamentals of design and calculation of machine parts*. (2nd ed.). Lviv: Afisha [in Ukrainian].
2. Loveikin, V.S., Romasevich, Yu.O. 2017. *Theory of technical systems*. Kyiv: CP "KOMPRINT" [in Ukrainian].
3. Machok, Yu.V., & Solovykh, E.K. (2012). Increasing the durability of soil-cutting elements of skid-mounted openers of grain seeders with wear-resistant coatings. *Design, manufacture and operation of agricultural machinery*, 42, 1, 176–183 [in Ukrainian].
4. Voytyuk, D.G., Aniskevich, L.V., Baranovsky, V.M. et al. (2015). *Agricultural machines*. D.G. Voytyuk (Ed.). Kyiv: Agroosvita [in Ukrainian].
5. Salo, V.M., Leshchenko, S.M., Luzan, P.G., Salo, L.V. (2022). *Machines for sowing, planting and caring for crops*. Kropyvnytskyi: Lysenko V.F. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/12307> [in Ukrainian].
6. Khurmi, R. S., & Gupta, J. K. (2020). *Theory of machines* (15th ed.). S. Chand & Company.
7. Mang, T., & Dresel, W. (Eds.). (2017). *Lubricants and lubrication* (3rd ed.). Wiley-VCH.
8. Salo, V. M., Bogatyrev, D. V., & Leshchenko, S. M. (2023). On the reliability of the technological process of crushing crop residues. *Design, production and operation of agricultural machines*, (53), 93–101 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.93-101>

9. Denysenko, M. I., & Opalchuk, A. S. (2015). Increasing the durability of working bodies of soil tillage, forage harvesting and sowing machines. *Scientific Bulletin of NUBiP of Ukraine. Series: Technology and Energy of Agricultural Industry*, (212/1), 52–61.
10. Cherepova, T., Dmitrieva, G., Tisov, O., Dukhota, O., & Kindrachuk, M. (2019). Research on the properties of Co-TiC and Ni-TiC HIP-sintered alloys. *Acta Mechanica et Automatica*, 13(1), 57–67. <https://doi.org/10.2478/ama-2019-0009>
11. Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
12. Amosov, V.V., Machok, Yu.V., Deikun, V.A. (2023). Increasing the durability of seed drill coulters. *Abstracts of XXV International Scientific and Practical Conference (June 26–28, 2023)*. Warsaw, Poland. [in Ukrainian].
13. Shmat, S.I., Luzan, P.G. & Salo, V.M. (2024). Improving the quality indicators of the sowing process. *Agricultural machinery*, 50, 113–119 [in Ukrainian].
14. Deikun, V.A., Zhuk, D.G., & Machok, Yu.V. (2022). Review of methods of application and efficiency of mineral fertilizers. Design, production and operation of agricultural machinery, 52, 41–47. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.41-47>. [in Ukrainian].
15. Machok, Y.V., Salo, V.M., & Luzan, P.G. (2022). On the expediency of sharpening the blades of tillage and sowing machines. *Materials of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference “Achievements and Prospects in the Field of Production, Processing and Storage of Agricultural Products”*. Kropyvnytskyi: TsNTU [in Ukrainian].

Yurii Machok, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Petrenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Dmytro Artemenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ruslan Kisilov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Project Engineering and Reliability of Soil-cutting Elements of Grain Drill Runner Openers

Modern agricultural machinery design demands innovative approaches to project engineering and reliability management for seeding machine components, leveraging system analysis and digital modeling to build competitive equipment. The soil-cutting elements of grain drill runner openers operate under severe abrasive wear and cyclic dynamic loads. Standard 65G steel runners typically provide a lifespan of only 80...120 ha, whereas modern agrotechnical standards require at least 200...250 ha without maintenance. This discrepancy necessitates new project engineering solutions, ranging from structural parameter optimization to advanced surface hardening.

The research methodology integrates structural reliability standards (ISO 9001:2015, EN 13306:2018), wear simulation via FEM (ANSYS Mechanical), analytical tribological models, and field testing of ZS-3.6 grain drill runner openers. The performance of standard blades (65G steel, 40 HRC) was compared against reinforced blades featuring a 0.8...1.2 mm cladding of WC–Ni–Fe ceramic-metal composite ribbon. Field trials were conducted in loamy soil environments (38...52% sand content, cone penetrometer hardness of 1.2...2.1 MPa) in Central Ukraine.

Statistical analysis indicated that 74.4% of runner opener failures are caused by blade wear exceeding a critical cutting edge radius ($R > 3.5$ mm). FEM analysis revealed that maximum equivalent von Mises stresses at the blade tip reach 512 MPa, exceeding the yield strength of 65G steel (415 MPa). To address this, a generalized wear model was adapted to identify tribological parameters, revealing that the WC–Ni–Fe coating provides a 2.4-fold reduction in wear rate. The analytical condition for blade self-sharpening was formulated, ensuring a stabilized blade angle up to 250 ha. Reliability was evaluated using a multi-criteria index, with time-to-failure modeled via the Weibull–Gnedenko distribution. For the reinforced runners, the characteristic life parameter increased from 112.4 to 248.6 ha, while K_R rose from 0.44 to 0.81. Field data confirmed that the self-sharpening effect reduced draft resistance by 18.2% at 150 ha, yielding a fuel savings of 0.85 L/ha.

A comprehensive project engineering methodology for grain drill runner openers was developed and verified. The reinforced WC–Ni–Fe composite runners achieved an operational lifespan of 230...260 ha, outperforming standard components by 2.1...2.4 times. The developed framework can be extended to design other soil-cutting and engaging components of tillage and seeding machinery.

project engineering, reliability, soil-cutting element, runner opener, abrasive wear, ceramic-metal coating, self-sharpening, resource length

Одержано (Received) 18.06.2026

Прорецензовано (Reviewed) 22.06.2026

Прийнято до друку (Approved) 25.06.2026