Список використаних джерел:

1. Антощенков Р. В., Кусков М. А. До дослідження плоско-паралельного руху посівного машинно-тракторного агрегату. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*, 2024. № 25. С. 291–305. https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.291-305.

2. Кусков М. А. Експериментальні дослідження посівного машинно-тракторного агрегату у складі трактора та сівалки Vega-8 W Profi. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*, 2025. № 26. С. 222–234. https://doi.org/10.64165/ts.2025.26.222-234.

3. Череватенко Г. І., Кусков М. А. Розрахунок економічної ефективності посівного та орного машинно-тракторних агрегатів. *Український журнал прикладної економіки та техніки*, 2025. Том 10. № 1. С. 395 – 398. https://doi.org/10.36887/2415-8453-2025-1-68.

Abstract: *The aim of optimizing the dynamics of a seeding machine-tractor unit is to improve its running characteristics. To achieve this, a theoretical analysis of the unit's plane-parallel motion is conducted, modeling it as a two-mass system with four degrees of freedom.*

Keywords: *dynamic properties, unit, sowing, plants, motion.*

УДК 621.81.004.6:519.24

ЙМОВІРНІСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕСУРСУ ДЕТАЛЕЙ МОЛОТИЛЬНОГО АПАРАТУ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНІВ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Олександра ВОЗНЮК

Здобувачка вищої освіти спеціальності 208 «Агроінженерія»

Миколаївський національний аграрний університет

м. Миколаїв, Україна

Анотація. *У роботі представлено ймовірнісний алгоритм прогнозування моменту появи першої втомної тріщини в деталях молотильного апарату комбайнів зі сталі 65Г. Авторами поєднано використання розподілу Вейбулла*

та статистичного моделювання методом Монте-Карло для врахування випадкового розсіювання властивостей металу. Визначено межі безпечного ресурсу партії деталей та підтверджено умови їх переходу до зони необмеженої довговічності.

Ключові слова: *втомна міцність, розподіл Вейбулла, метод Монте-Карло, сталь 65Г, надійність.*

Елементи та робочі органи молотильних апаратів сучасних зернозбиральних комбайнів під час експлуатації зазнають інтенсивних циклічних навантажень, які часто стають причиною втомного руйнування металу.

Традиційні інженерні методи розрахунків базуються на детермінованих коефіцієнтах запасу міцності. Вони орієнтовані на «середній» термін служби та не враховують природну неоднорідність матеріалу: наявність випадково розподілених мікродефектів, пір чи неметалевих включень. Для підвищення точності прогнозування відмов та переходу до ефективних стратегій технічного сервісу доцільно застосовувати стохастичні (ймовірнісні) підходи.

Об’єктом дослідження є процес накопичення втомних пошкоджень у сталевих структурах за циклічного навантаження. Предметом дослідження є математичне моделювання ресурсу деталі до моменту появи першої тріщини з урахуванням розсіювання властивостей металу.

Для моделювання використано двопараметричний розподіл Вейбулла, який найкраще описує кінетику втомного зношування завдяки врахуванню асиметрії відмов у часі (параметр форми $k > 1$ вказує на фазу інтенсивного зношення та втоми). Зв’язок між амплітудою напружень σ_a та характеристичним ресурсом λ (цикли, за яких виходить із ладу ~63,2% зразків) встановлювали за допомогою рівняння кривої втоми Велера (S-N кривої):

$$\lambda = N_G \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a} \right)^m .$$

Дослідження проводилось для пружинно-ресорної сталі 65Г (після гартування та середнього відпуску до твердості 40-45 HRC). Вхідні параметри

моделювання: границя витривалості при симетричному згині $\sigma_{-1} = 440\,\text{МПа}$; базова кількість циклів випробувань $N_G = 10^7$; показник нахилу втомної кривої $m = 9$; параметр форми Вейбулла $k = 3$. Статистичний аналіз невизначеності навантажень та тривалості життя деталей реалізовано шляхом генерації масиву з 1000 сценаріїв методом Монте-Карло за допомогою інверсованої функції розподілу.

На першому етапі було змодельовано поведінку деталей за значного амплітудного перевантаження $\sigma_a = 550\,\text{МПа}$, що суттєво перевищує границю витривалості матеріалу. Розрахунковий характеристичний ресурс λ склав 1,34 · 10^6 циклів. Комп'ютерна симуляція дозволила встановити «безпечний ресурс» партії деталей – термін, за якого ймовірність появи першої тріщини не перевищує 5%. Для цієї вибірки критерій 5%-го ризику досягається після 557,7 тис. циклів. Масовий вихід деталей із ладу (мода розподілу) зафіксовано на рівні 1,2 млн. циклів.

На другому етапі досліджено вплив зниження діючого напруження на 10% ($\sigma_a = 495\,\text{МПа}$). Завдяки високій чутливості сталі 65Г до амплітуди навантажень (унаслідок високого показника степеня $m = 9$) тривалість безпечної експлуатації до появи перших тріщин (5% ризику) змістилася до приблизно 1,464 млн. циклів. Таким чином, зменшення робочого навантаження всього на 10% забезпечує збільшення ресурсу елемента у 2,6 разу.

Третій етап передбачав аналіз роботи в режимі, коли діюче напруження падає нижче границі витривалості ($\sigma_a = 430\,\text{МПа}$). Моделювання підтвердило положення класичної теорії: понад 95% досліджуваних деталей успішно долають стандартну тестову базу 10^7 циклів без утворення мікротріщин. Це засвідчує перехід матеріалу в зону практично необмеженої довговічності.

Поєднання розподілу Вейбулла із методом Монте-Карло надає інженерам можливість оцінювати не лише абстрактний середній термін служби, а й прогнозувати точні ризики ранніх відмов у реальних партіях деталей. Отримані

кількісні закономірності чутливості сталі 65Г є основою для оптимізації розрахунків коефіцієнтів безпеки та обґрунтування гарантійних зобов'язань.

Практичне впровадження розробленого алгоритму дозволяє підприємствам аграрного сектору відмовитися від неефективної стратегії «ремонту за фактом відмови» на користь прогресивної стратегії обслуговування машин за їхнім фактичним технічним станом.

Список використаних джерел

1. Birolini A. Reliability Engineering: Theory and Practice. 8th Edition. Springer, 2017.

2. Schijve J. Fatigue of Structures and Materials. 2nd Edition. Springer Science & Business Media, 2012.

3. Stephens R. I., Fatemi A. Metal Fatigue in Engineering. 3rd Edition. Wiley, 2020.

4. Rinne H. The Weibull Distribution: A Handbook. CRC Press, 2021.

Abstract. *The paper presents a probabilistic algorithm for predicting the moment of appearance of the first fatigue crack in the details of the threshing apparatus of combines made of 65G steel. The authors combined the Weibull distribution and Monte Carlo statistical simulation to account for the statistical scatter of metal properties. The boundaries of the safe resource for a batch of parts were determined and the conditions for their transition to the zone of unlimited durability were verified.*

Keywords: *metal fatigue, Weibull distribution, Monte Carlo method, steel 65G, reliability.*

Науковий керівник:

Бойчук О.В.

канд. фіз.-мат. наук, доцент

Миколаївський національний аграрний університет