



УДК 631.3:678

В. В. Аулін¹, д.т.н.

ORCID 0000-0003-2737-120X

О. Д. Деркач², к.т.н.,

ORCID 0000-0002-5537-8022

А. В. Гриньків¹, к.т.н.,

ORCID 0000-0002-4478-1940

Д. О. Макаренко², к.т.н.,

ORCID 0000-0002-3166-6249

¹Центральноукраїнський національний технічний університет²Дніпровський державний аграрно-економічний університет

e-mail: flymakd@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ РОБОЧОЇ ТЕМПЕРАТУРИ КОМПОЗИТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РУХОМИХ З'ЄДНАНЬ В ЗОНІ ТЕРТЯ

Анотація. В статті сформульовано проблеми, пов'язані з розподіленням теплового потоку у трибоспряженнях сільськогосподарської техніки. Наведено основні напрямки впровадження полімерно-композитних матеріалів в конструкції машин і механізмів. Розглянуто протікання явища теплопровідності в полімерному підшипнику, що обертається на валу або в корпусі. Наведено рівняння для визначення розподілення теплоти у вигляді теплового потоку та вираз для визначення теплового потоку, що надходить у зовнішнє середовище через підшипник і вал. Результати випробувань експериментального підшипника підтвердили працездатність запропонованого типу рухомих спряжень «полімерний композит-сталь». Запропоновані рівняння для визначення температури в зоні тертя при взаємодії полімерно-композитних матеріалів зі сталлю дозволяють обґрунтувати допуски та посадки вказаних елементів рухомих з'єднань.

Ключові слова: рухомі з'єднання, температура, полімерно-композитні матеріали, трибоспряження, полімерний композит-сталь.

Постановка проблеми. Сьогодні перед виробниками с.-г. техніки постають питання не тільки підвищення технічного рівня машин, але і питання економічного характеру. Впровадження полімерно-композитних матеріалів (ПКМ) у конструкції сільськогосподарських машин обґрунтовується у першу чергу за критеріями економічними, а вже потім фізико-механічними, логістичними. Також важливу роль відіграє і залежність виробника с.-г. техніки від постачальника ПКМ. Тому, вибір конкретної марки ПКМ для використання у конструкції певних с.-г. машин є завданням суттєвого підвищення технічного рівня



і економічної безпеки виробництва, що є актуальним в сучасних мінливих умовах міжнародної співпраці [1-3].

В конструкціях сучасних посівних машин використовуються ПКМ для виготовлення бункерів, насіннєпроводів, бандажів опорних та прикочуючих коліс, котушок дозуючих механізмів та ін. В залежності від призначення деталей, вони виготовляються з різних матеріалів [4].

Відомо, що на теперішньому рівні технічного розвитку жоден вітчизняний (зокрема, ПАТ «Ельворті») та зарубіжні виробники високотехнологічних сільськогосподарських машин (John Deere, Gaspardo, Kinze) не застосовували принцип необслуговування рухомих з'єднань. При цьому виробничі втрати від недовикористання техніки зростають за рахунок її простоювання в сервісі під час польових робіт. Простої техніки, викликані усуненням відмов або проведенням ТО, призводить до затягування агротехнічних термінів проведення технологічних операцій, зокрема підготовки ґрунту та сівби, внаслідок чого втрачається врожай [5-7].

Одним з напрямків підвищення довговічності трибоспряджень машин і механізмів є впровадження ПКМ з адаптованими властивостями. Властивості таких матеріалів можна змінювати в широкому діапазоні за рахунок зміни концентрації різноманітних наповнювачів.

Аналіз останніх досліджень. Вирішити завдання підвищення надійності рухомих з'єднань і, як результат сільськогосподарських машин взагалі, можна шляхом впровадження у їх рухомі спрядження деталей з ПКМ конструкційного призначення [8,9]. Детально обґрунтовано параметри деталей комбайнів, виготовлених з ПКМ, при взаємодії зі сталлями, з врахуванням навантаження, лінійної швидкості ковзання та шорсткості поверхонь [10]. Відомий позитивний досвід впровадження ПКМ в трибоспрядження механізму копіювання посівного комплексу Агро-Союз Turbosem II 19-60 [11,12]. У вказаних наукових працях детально розглянуто властивості, характеристики ПКМ та їх адаптація до конкретних умов роботи для забезпечення міцнісних вимог конструкцій та підвищення довговічності машин і механізмів. В деяких конструкціях рухомих з'єднань в якості підшипників ковзання використовують матеріали на основі деревини [13,14]. Використання таких матеріалів обмежене вузькою сферою їх застосування за рахунок незначного діапазону режимів експлуатації. В більшості випадків їх використовують, як опорні підшипники ковзання механізму сепарації зернозбиральних комбайнів, проміжних опорах шнекових транспортерів та ін.

Досліджено процеси розподілу контактного напруження, що виникає в зоні контакту при статичному навантаженні [15-17].

Уточнені методи рішення контактної задачі з врахуванням сил тертя та за дії зсувного навантаження розглянуто в наукових працях [18,19].

В наведеній вище науковій літературі недостатньо висвітлені питання обґрунтування температурних режимів ПКМ в спряженнях із металами. Основною причиною втрати працездатності ПКМ неметалевого походження є їх надмірне нагрівання в процесі тертя, і як результат втрата форми. Це призводить до збільшення ударних навантажень, і в подальшому до руйнування вказаних деталей. Тому, визначення температурного режиму роботи деталей з ПКМ є актуальним завданням сьогодення.

Формулювання цілей статті. Визначення температурного діапазону роботи трибоспряження типу «полімерний композит-сталь» в залежності від зміщень, деформацій та напружень, що виникають під час експлуатації.

Основна частина. Нагрівання підшипника відбувається за рахунок процесу тертя в зоні контакту при обертанні навколо валу. Розглянемо протікання явища теплопровідності в полімерному підшипнику, що обертається на валу або в корпусі. Рішення задачі пов'язане з необхідністю за початковими параметрами (розміри підшипника, пружні постійні, коефіцієнти тертя та ін.) при заданому зовнішньому навантаженні і частоті обертання валу визначити температуру в області контакту «валу – вкладиш» або «вкладиш – корпус» для порівняння її з допустимою. Дослідження температурного поля в полімерному підшипнику дозволяє розрахувати зміну її зовнішнього і внутрішнього діаметру, тобто передбачити температурні компенсації за оптимальних значень зазору і натягу в з'єднаннях «вал – вкладиш» або «вкладиш – корпус». Нехай маємо полімерний вкладиш з внутрішнім радіусом R_1 і зовнішнім R_2 . Зовнішній радіус металевої втулки R_3 . Довжина підшипника l . В підшипник встановлений металевий вал довжиною L причому $L > l$ (рис. 1, 2).

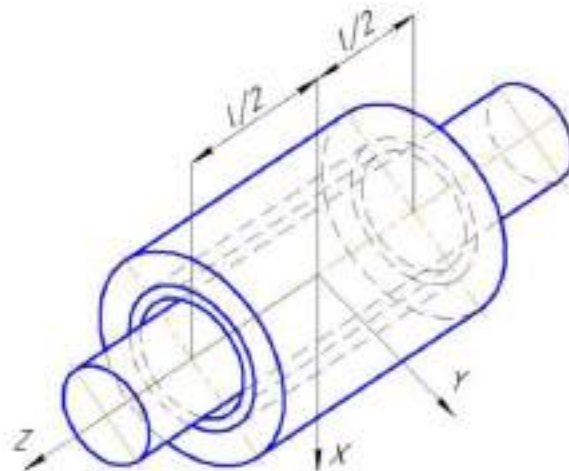


Рисунок 1. Схема для розрахунку температури в зоні третя

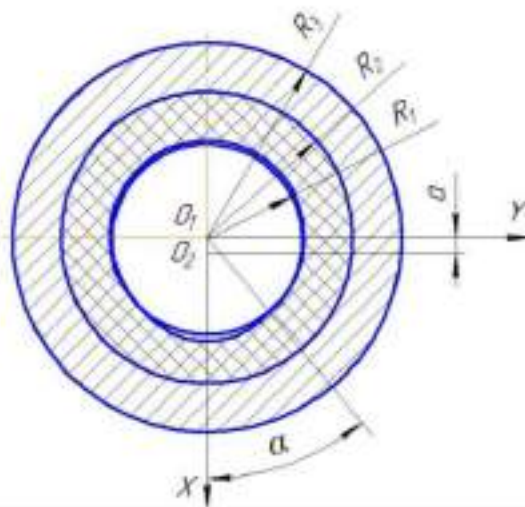


Рисунок 2. Схема контакту «вал-вкладиш»

Під дією статичного навантаження P відбувається впровадження валу з утворенням кута α контакту (рис. 2).

Розподіл контактного напруження можна представити у вигляді:

$$\sigma_{rr} = (P \cdot (R_1 \cdot l) \cdot (\alpha \cos \alpha \sin \alpha))^{-1} \cdot F(\varphi), \quad (1)$$

де:

$$F(\varphi) = \begin{cases} \cos \varphi - \cos \alpha, & \text{при } (\varphi) \leq \alpha; \\ 0, & \text{при } (\varphi) \geq \alpha. \end{cases} \quad (2)$$

φ – координата в системі полярних координат r - φ ;

α – кут напівохоплення, тобто половина кута трибологічного контакту в спряженні деталей підшипника.

Нагрівання підшипника відбувається за рахунок процесу тертя в зоні контакту при обертанні навколо валу. Розподіл теплоти q на поверхні контакту у вигляді теплового потоку в одиницю часу з одиниці площі контакту дорівнює:

$$q = \Omega \nu \sigma_{rr} f_{\text{тр}} \quad (3)$$

де: $\Omega = (1787.8)^{-1}$ Дж/Г; ν – швидкість ковзання валу в підшипнику; $f_{\text{тр}}$ – коефіцієнт тертя (з експерименту); σ_{rr} – контактне напруження.

Частина теплоти що виділяється тепловими джерелами (зоною тертя), передається в зовнішнє середовище через підшипник, інша частина – через вал. Тепловий потік, що надходить у зовнішнє середовище через підшипник і вал визначається за виразом:

$$q_{\text{п}} = \beta_{\text{п}} \cdot \Gamma \cdot F(\varphi); \quad q_{\text{в}} = (1 - \beta_{\text{п}}) \cdot \Gamma \cdot F_1(\varphi). \quad (4)$$

де $\Gamma = \frac{(\Omega \cdot \nu \cdot f_{\text{тр}} \cdot P)}{(R_1 \cdot l (\alpha - \cos \alpha \sin \alpha))}$; $\beta_{\text{п}}$ – коефіцієнт розділення теплоти

його значення визначається залежно від k_0 при різних відношенні поверхонь тепловіддачі підшипника $F_{\text{п}}$ та $F_{\text{в}}$ знаходять по [9-12].

Для визначення температури в довільній точці підшипника необхідно розв'язати рівняння теплопровідності. При цьому можна

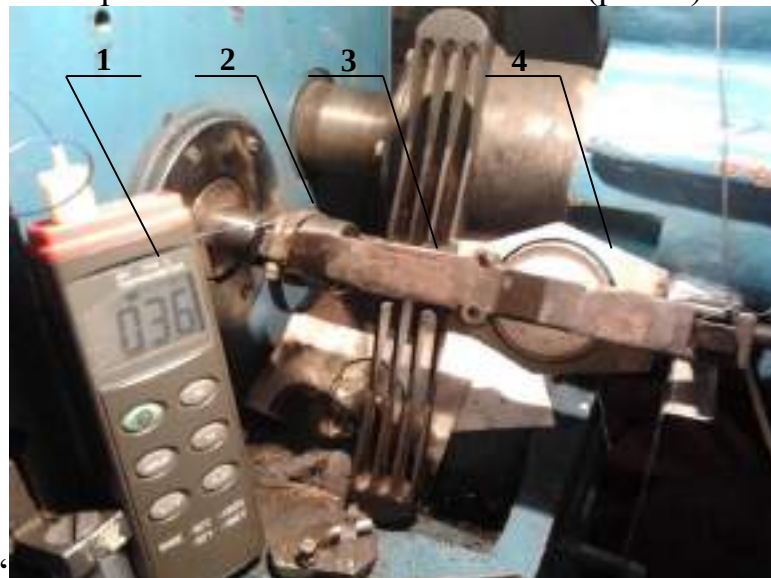
прийняти, що тепловий потік в осьовому напрямі підшипника відсутній внаслідок малої площі його торцевих поверхонь. Вважаємо, що розподіл температури не залежить від координати Z . Через те, що товщина металевої втулки (корпус) і полімерного підшипника одного порядку, то в першому наближенні температура корпусу в кожній точці постійна і співпадає з температурою зовнішньою поверхнею підшипника:

$$t^{(1)} = \beta_{\Pi} \cdot q_{\Pi} \cdot R_1 \cdot \left(\frac{1}{\lambda^{(1)}} \ln \frac{R_2}{r} + \frac{1}{\eta \cdot R_3} \right) \quad (5)$$

На підставі приведених формул для розрахунку температури в зоні тертя (1-5), можна визначати температурний режим роботи спряження «полімерний композит-сталь» в залежності від зміщень, деформацій та напружень, що виникають під час роботи. Це дозволить передбачати температурні компенсації та використовувати їх при обґрунтуванні допусків та посадок елементів рухомих спряжень виготовлених з композитних матеріалів неметалевого походження.

Виконані стендові дослідження роботи експериментального підшипника прикочуючого колеса сівалки, в якому застосовано трибоспряження типу «полімерний композит-сталь».

Дослідження виконано на машині тертя СМТ-1 з використанням допоміжного устаткування та пристосувань: термопар К-301, динамометр еталонний, індикатор годинникового типу, спеціальне оснащення для створення осьового навантаження (рис. 3).



1 – термопара К-301; 2 – експериментальний підшипник; 3 – спеціальне оснащення для створення осьового навантаження; 4 – динамометр еталонний

Рисунок 3. Випробування підшипника на машині тертя СМТ-1 з використанням додаткового обладнання



Режими дослідження: частота обертання – 250 хв^{-1} (еквівалент швидкості МТА: для прикочуючого колеса діаметром 160 мм 8...9 км/год); навантаження осьове – 200 Н; навантаження радіальне – 250 Н; тривалість одного досліду – 40 хв; кількість повторювань – 3.

Після кожного досліду, підшипник охолоджувався до температури 20°C . Остаточний результат визначався як середнє арифметичне на основі результатів 3-х повторювань. Найбільша температура в зоні тертя становила 86°C (у процесі припрацювання,). Середня температура в околі тертя знаходилась в межах $48\text{--}52^{\circ}\text{C}$. Розрахункові значення температури відповідно до приведених рівнянь – 56°C .

Висновки. Встановлено, що зростання температури в залежності від тривалості експлуатації підшипника не відбувається. Фізико-механічні властивості матеріалу підшипника у процесі експлуатації залишаються сталими, тріщин або «схоплювання» матеріалу зі сталлю не зафіксовано. Зміни геометричних параметрів деталей експериментального підшипника не виявлено. За примусового введення природного абразиву в зону тертя (висушений та подрібнений ґрунт) характер тертя не змінився. Під час випробування сторонніх шумів чи вібрацій не зафіксовано.

Отримані результати свідчать про доцільність використання трибоспряжень типу «полімерний композит-сталь». Розроблені рівняння для визначення температури в зоні тертя трибоспряжень «полімерно-композитний матеріал – сталь», дозволяють обґрунтувати допуски та посадки елементів рухомих спряжень.

Список використаних джерел

1. Manita I. Y., Komar A. S. Justification of the energy saving mechanism in the agricultural sector. *Engineering of nature management*. 2021. №1(19). Pp. 7–12.
2. Serebryakova N., Podashevskaya H. Selection of optimal modes of heat treatment of grain. 2020. Pp. 20–24.
3. Sklar R. Directions of increasing the efficiency of energy use in livestock. *Current issues of science and education: Abstracts of XIV International Scientific and Practical Conference*. Rome. 2021. Pp. 171–176.
4. Zhuravel D., Boltianska N. Integrated approach to ensuring the reliability of complex systems. *Current issues, achievements and prospects of Science and education: Abstracts of XII International Scientific and Practical Conference*. Athens. 2021. Pp. 231–233.
5. Komar A. Definition of priority tasks for agricultural development. *Multidisciplinary research: The XIV International scientific-practical conference*. Bilbao. 2020. Pp. 431–433.
6. Skliar O. Measures to improve energy efficiency of agricultural production. *Social function of science, teaching and learning: Abstracts of*



XIII International Scientific and Practical Conference. Bordeaux. 2020. Pp. 478-480.

7. Manita I., Podashevskaya N. Application of nanotechnology in technological processes of animal husbandry in Ukraine. 2020. №2(16). Pp. 33–37.

8. Деркач О.Д., Буря О.І. Підвищення технічного рівня електро-, автомобільного транспорту та сільськогосподарської техніки за рахунок використання нових матеріалів. Наукові рекомендації: Дніпропетровськ: ДДАУ. 2011. 71 с.

9. Кузнецова О.Ю. Розробка фулереновмісних композитних матеріалів на основі фенілону для деталей конструкційного призначення: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.01 / Луцький національний технічний університет, 2013. 23 с.

10. Деркач О.Д. Обґрунтування параметрів обертових елементів робочих органів зернозбиральних комбайнів: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.05.11 / Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя. Тернопіль, 2006. 20 с.

11. Деркач А.Д., Науменко Н.Н., Макаренко Д.А. Применение углепластиков в широкозахватных посевных машинах. *Mechanization in agriculture. International scientific, scientific applied and informational journal*. Year LXI, 2/2015, Sofia. 2015. P. 3-6.

12. Макаренко Д.О. Підвищення довговічності паралелограмного механізму посівних комплексів зміною конструкції рухомих з'єднань: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.05.11 / Центральноукраїнський національний технічний університет. Кропивницький. 2018. 20 с.

13. Невзорова А. Б., Врублевская В. И., Дашковский В. А. Использование самосмазывающихся подшипников скольжения на основе прессованной древесины в узлах трения сельскохозяйственной техники. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2009. Вип. 39. С. 332-336.

14. Врублевский В.Б., Дашковский В.А., Макеев В.В., Матусевич В.О. Увеличение ресурса работы узлов трения в промежуточных опорах шнековых транспортеров. *Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин*. Новополюцк. 2007. С. 129-133.

15. Истихин С.В., Кувшинова О.А., Истихин А.С. Определение допустимых величин посадок неподвижных соединений и пространственно-геометрических отклонений осей деталей при восстановлении подшипниковых соединений полимерными композициями. *Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: материалы Межд. научно-практ. конф.* Саранск. 2018. С. 291-296



16. Босаков, С. В. Метод Ритца в контактных задачах теории упругости: монография. Брест: БрГТУ, 2006. с. 107.

17. Божкова, Л. В., Рябов, В. Г., & Норицина, Г. И. Смешанная плоская задача теории упругости для двухслойной кольцевой области. *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*. 2011. Вип. 1. С. 217-221.

18. Божкова Л.В., Норицина Г.И., & Рябов В.Г. Уточненный метод решения контактной задачи для кольцевого слоя с учетом сил трения. Решение функциональных уравнений, определяющих математическую модель контактной задачи. *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*. 2014. Вип. 4 (3 (21)). С 5-9.

19. Скородинський, І.С. Аналіз деформування кусково-однорідного тіла з в'язкопружним проміжним шаром за дії зсувного навантаження. *Приклад. пробл. механіки і математики*. 2008. Вип. 6. С. 175-182.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2021 р.

V. Aulin¹, O. Derkach², A. Hrynkiv¹, D. Makarenko²

¹Central Ukrainian National Technical University

²Dnipro State Agrarian and Economic University

DETERMINATION OF THE OPERATING TEMPERATURE OF COMPOSITE ELEMENTS OF MOVABLE JOINTS IN THE FRICTION ZONE

Summary

The article formulates the problems associated with increasing the durability of agricultural machinery. It is proposed to implement in mobile joints tribo-mated parts type "polymer composite-steel". The main directions of introduction of polymer-composite materials in the design of machines and mechanisms are given. The course of the phenomenon of thermal conductivity in a polymer bearing rotating on a shaft or in a housing is considered. The equation for determining the heat distribution in the form of heat flux is given. The equation for determining the heat flux entering the environment through the bearing and shaft is proposed. It is assumed that the temperature of the housing at each point is constant and coincides with the temperature of the outer surface of the bearing. Determination of the temperature field in the polymer bearing allows to calculate the change in its outer and inner diameter, ie to provide temperature compensation at optimal values of clearance and tension in the connections "shaft - liner" or "liner - housing".

It was found that the highest temperature in the friction zone was 86 ° C (running-in process). The average temperature zone the friction was in the range of 48-52 ° C. Estimated values of temperature in accordance with the above equations - 56 ° C. It was found that the temperature does not increase depending on the work time of the bearing. Changes in the physical and mechanical properties of the bearing material not detected. No changes in the geometrical parameters of the experimental parts were detected. At forced introduction of natural abrasive in a friction zone the character of friction didn't change. The results of research of the experimental bearing indicate the feasibility of



using tribo-mated parts types "polymer composite-steel" in the constructions of machines and mechanisms. The proposed equations for determining the temperature in the friction zone during the interaction of PCM with steel allow to substantiate the tolerances and landings of the elements of mobile joints made of PCM.

Key words: movable joints, temperature, polymer-composite materials, tribo-mated parts, polymer composite-steel.

В.В. Аулин¹, А.Д. Деркач², А.В. Грынъкив¹, Д.А. Макаренко²

¹Центральноукраинский национальный технический университет

²Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ КОМПОЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВИЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ЗОНЕ ТРЕНИЯ

Аннотация

В статье сформулированы проблемы, связанные с повышением долговечности сельскохозяйственной техники. Приведены основные направления внедрения полимерно-композиционных материалов в конструкции машин и механизмов. Приведены уравнения для определения распределения теплоты в виде теплового потока и выражение для определения теплового потока, поступающего во внешнюю среду через подшипник и вал. Результаты испытаний экспериментального подшипника подтвердили работоспособность предложенного типа подвижных сопряжений «полимерный композит-сталь». Предложенные уравнения для определения температуры в зоне трения при взаимодействии полимерно-композитных материалов со сталью позволяют обосновать допуски и посадки указанных элементов подвижных соединений.

Ключевые слова: подвижные соединения, температура, полимерно-композиционные материалы, трибосопряженные детали, полимерный композит-сталь.