

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Propozycja metody badawczej materiałów ciernych stosowanych w hamulcach maszyn przemysłu rolniczego

ELIZA BORAWSKA, ANDRZEJ BORAWSKI
POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA

Słowa kluczowe: inżynieria mechaniczna, maszyny rolnicze, hamulce, Ball-Cratering, metoda Taguchi

STRESZCZENIE:

Dynamiczny rozwój przemysłu motoryzacyjnego dotknął również pojazdy wykorzystywane w pracach polowych. Poruszają się one z coraz to większymi prędkościami, charakteryzują się też większymi masami. Ich zatrzymanie wymaga więc stosowania nowych, bardziej wydajnych hamulców. To z kolei wymusza prowadzenie licznych badań mających na celu optymalizację składu okładzin ciernych. Do badań wykorzystuje się różne metody. Najkorzystniej jest, jeżeli wykonuje się badania na obiekcie rzeczywistym. Jednak mało kiedy jest to możliwe. W badaniach laboratoryjnych próbuje się jak najlepiej odzwierciedlić obiekt badań, jednak stanowiska badawcze zapewniają jedynie pewne przybliżenie. Wielu naukowców zajmuje się obecnie badaniami symulacyjnymi. Ich główną zaletą jest niski koszt oraz praktycznie nieograniczona możliwość wariacji warunków badań.

Niniejsza praca ma na celu zaproponowanie nowej metody badawczej wykorzystującej kontakt Ball-Cratering. Do odpowiedniego zaplanowania eksperymentu zaproponowano metodę optymalizacji procesów Taguchi. W celu zweryfikowania prawidłowości proponowanej metody wykonano przykładowe badania. Wyznaczono w nich wartości współczynnika tarcia oraz współczynnika szybkości zużycia ściernego.

Proposed research method of agricultural machinery brakes friction materials

Keywords: mechanical engineering, agricultural machinery, brakes, Ball-Cratering, Taguchi method

ABSTRACT:

The dynamic development of the automotive industry also affected vehicles used in agricultural. They are running at higher speeds, they are also characterized by larger masses. Their stopping therefore requires the use of new, more efficient brakes. This, in turn, requires numerous studies to optimize the composition of friction materials. Various methods are used for research. It is most beneficial if tests are carried out on a real object. However, not often it is possible. Laboratory tests attempt to reflect the research object as closely as possible, but the test stands provide only some approximation. Many researchers are currently involved in simulation research. Their main advantage is lower cost and virtually unlimited variation of test conditions.

This work aims to propose a new research method using Ball-Cratering contact. The method of Taguchi optimizing processes was proposed for the appropriate planning of the experiment. In order to verify the correctness of the proposed method, examinations were carried out. As a result, the values of the coefficient of friction and the coefficient of abrasive wear rate were determined.

1. WSTĘP

Rozwój przemysłu oraz coraz to nowe materiały, charakteryzujące się lepszymi właściwościami, spowodowały, że w ostatnich latach przemysł rolniczy rozrasta się bardzo intensywnie [1]. Tendencje w rolnictwie pokazują, że coraz więcej jest gospodarstw o dużych areałach. Sytuacja taka sprawia, że wymaga się specjalistycznego sprzętu, który szybko i dokładnie wykona prace polne. Naprzeciw tym wymaganiom wychodzą producenci sprzętu rolniczego. Wiele koncernów opracowało i wdrożyło do produkcji ciągniki bez problemu osiągające prędkości jazdy rzędu 60 km/h [2, 3]. Jeżeli wziąć pod uwagę masę całkowitą takiego pojazdu oraz uwzględnić opory uciągu i przeznaczenie, trzeba przyznać, że jest to imponujące osiągnięcie. Pamiętać jednak należy, że zarówno na drogach, jak i na polach zdarzają się sytuacje awaryjne, które wymagają szybkiego zatrzymania. Konieczne jest więc wyposażenie maszyn rolnych w odpowiednio skuteczne hamulce [4, 5]. Najczęściej stosowanymi rozwiązaniami są hamulce cierne, działające na wszystkie osie pojazdu lub zestawu pojazdów [6]. Moment hamujący generowany jest w wyniku współpracy pary ciernej. Energia kinetyczna ruchu zamieniana jest wówczas na energię cieplną. Ta z kolei odprowadzana jest zarówno do atmosfery, jak też do najbliższych położonych podzespołów zawieszenia. Na skuteczność tego procesu wpływa przede wszystkim

wartość współczynnika tarcia pomiędzy elementami roboczymi układu hamulcowego. Ten z kolei zależy od użytych materiałów. Mieszanka stosowana do produkcji okładzin ciernych składa się średnio z 15-20 składników [7]. Niejednorodny skład materiału ciernego powoduje z kolei trudności z wyznaczeniem jego właściwości. W niniejszej pracy podjęto więc próbę opracowania metodyki badań, która pozwoli na uzyskanie jednoznacznych i powtarzalnych wyników.

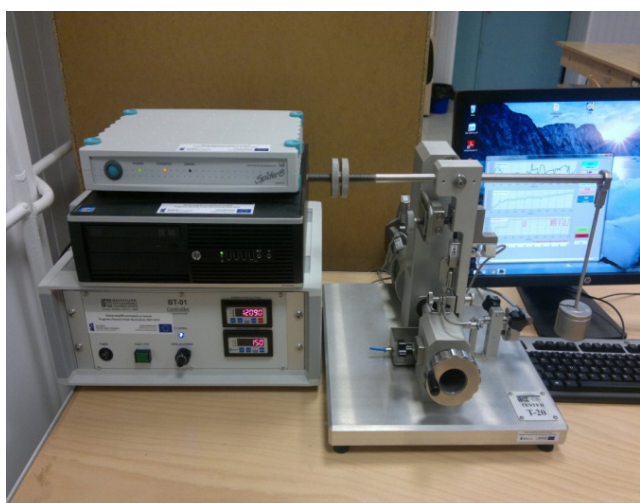
2. METODOLOGIA

Badania naukowe są trudnym zadaniem. Wymagają one obszernej wiedzy i doświadczenia. Pomocna jest też analiza stanu wiedzy, dzięki której można uniknąć wielu błędów [8, 9]. Otrzymane wyniki nie zawsze są zadowalającej jakości. Zadbaj należy więc o szereg szczegółów, takich jak dobór odpowiedniego stanowiska czy prawidłowe zaplanowanie eksperymentu. Należy również mieć na uwadze również dokładność pomiaru, która często niesie za sobą błędy pomiarowe [10].

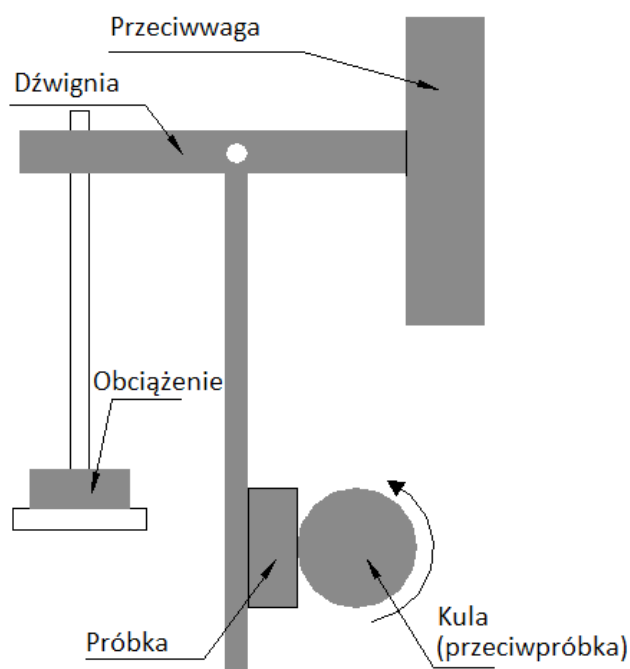
2.1 Wybór stanowiska badawczego

Na rynku dostępnych jest wiele stanowisk badawczych pozwalających wyznaczyć np. wartość współczynnika tarcia. Do badań materiałów ciernych wykorzystywane jest najczęściej stanowisko typu Pin-On-Disc, zapewniające liniowy rodzaj

kontaktu. Jest ono najlepszym odzwierciedleniem hamulców tarczowych. W pojazdach rolniczych wykorzystywane są głównie hamulce bębnowe. Bardziej zbliżone byłoby więc stanowisko zapewniające kontakt powierzchniowy, jednak tribotestery tego typu są rzadko spotykane. Postanowiono więc wykorzystać stanowisko T-11 (Rys. 1), będące na wyposażeniu Politechniki Białostockiej. Rodzaj kontaktu (tzw. Ball-Cratering) nie do końca odpowiada warunkom rzeczywistym panującym w hamulcach, jednak jak wykazano w dalszej części pracy oraz w poprzednich publikacjach [11, 12], prawidłowo zaprojektowany eksperyment o odpowiedniej liczbie powtórzeń zapewnia wyniki wysokiej jakości.



Rysunek 1 Stanowisko badawcze typu Ball-Cratering (źródło: własne)



Rysunek 2 Schemat układu badawczego stanowiska

Próbka montowana w uchwycie powinna mieć kształt walca (Rys. 2). Podczas badań współpracuje ona z przeciwpróbką – kulą – zamontowaną w uchwycie silnika. Dzięki odpowiednio wyważonej dźwigni założenie ciężarków na szalce zapewnia odpowiedni docisk próbki do przeciwpróbki. Stanowisko to pozwala na bezpośredni pomiar siły tarcia, dzięki czemu można wyznaczyć wartość współczynnika tarcia – najważniejszej właściwości materiału ciernego. Możliwe jest również dodanie do węzła tarcia np. środka smarnego lub przyspieszającego zużywanie. Znane są także modyfikacje stanowiska, w których wykorzystuje się więcej niż jedną kulę [13-15].

2.2 Planowanie eksperymentu

Prawidłowe zaplanowanie eksperymentu pozwala skrócić czas badań przy zachowaniu wysokiej jakości wyników [16]. W proponowanej metodzie nie chodzi jednak o znaczne skrócenie czasu, tylko o wysoką jakość uzyskanych wyników oraz ich dobrą powtarzalność. Wykorzystano w tym celu metodę optymalizacji procesów Taguchi, która jest powszechnie stosowana w tego typu badaniach [17, 18].

Pierwszym krokiem planowania powinno być opracowanie tablicy ortogonalnej. Eksperyment ma trzy parametry wejściowe: obciążenie, drogę tarcia i prędkość obrotową kuli. Zgodnie z zasadami metody założono, że każdy z nich przyjąć może trzy wartości. Tablica będzie więc miała wymiar 9×3 . Aby prawidłowo dobrać wartości parametrów, wykonać należy badania wstępne. W rozpatrywanym przykładzie okazało się, że proponowane w normie [19] wartości obciążenia są zbyt małe. Postanowiono więc, że zamiast wartości 0,2 N, 0,4 N i 0,6 N przyjęte będą wartości 1 N, 2 N i 3 N. Ostateczną postać tablicy pokazano w Tabeli 1. Zauważyć w niej można, że należy wykonać dziewięć badań wstępnych, przy czym zalecane jest, aby każde z nich powtórzone zostało przynajmniej trzykrotnie. Otrzymane wyniki wykorzystane zostaną do wyznaczenia wartości parametrów badań właściwych.

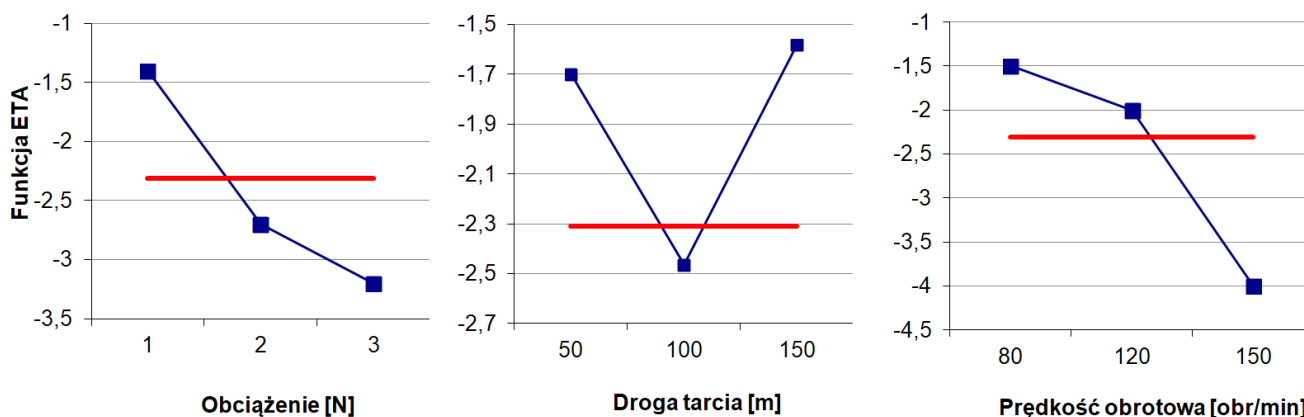
Tabela 1 Tablica ortogonalna badań wstępnych
(źródło: własne)

| Nr badania wstępnego | Obciążenie P [N] | Droga tarcia S [m] | Prędkość obrotowa przeciwpróbki n [obr/min] |
|----------------------|------------------|--------------------|---|
| 1 | 1 | 50 | 38 |
| 2 | 1 | 100 | 80 |
| 3 | 1 | 150 | 150 |
| 4 | 2 | 50 | 80 |
| 5 | 2 | 100 | 150 |
| 6 | 2 | 150 | 38 |
| 7 | 3 | 50 | 50 |
| 8 | 3 | 100 | 150 |
| 9 | 3 | 150 | 80 |

Wykonując badania wstępne, a następnie mierząc wielkości kraterów w próbkach, obliczyć można wartości funkcji ETA określającej stosunek sygnał/zakłócenie. Pożądana jest jak najwyższa wartość tej funkcji, kierowano się więc kryterium „im większe – tym lepsze”. Zgodnie z nim funkcja ma postać:

$$\eta(y_i) = 10 \lg_{10} \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i^2 \right) \quad (1)$$

gdzie: m – liczba pomiarów (w niniejszym przypadku $m = 3$), y_i – wynik badań wstępnych. Do wzoru podstawić należy uzyskane w badaniach wstępnych wyniki. W badaniach przykładowych otrzymano funkcję przedstawioną na Rysunku 3. Na podstawie analizy wykresów dobrać należy parametry wejściowe eksperymentu, które wynoszą odpowiednio: obciążenie $N = 1$ N, droga tarcia: $S = 150$ m, prędkość obrotowa kuli: $n = 80$ obr/min.

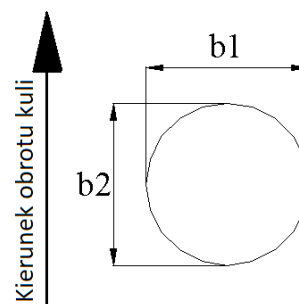


Rysunek 3 Funkcja ETA przykładowych badań

2.3. Analiza wyników badań

Bezpośrednimi wynikami badań są krater powstałe w próbkach oraz wartości siły tarcia mierzone z częstotliwością ustawioną w oprogramowaniu stanowiska. Średnicę powstałego krateru należy mierzyć w dwóch płaszczyznach (Rys. 4), a następnie wyliczyć ich wartość średnią:

$$b = \frac{b1+b2}{2} \quad (2)$$



Rysunek 4 Sposób pomiaru kraterów

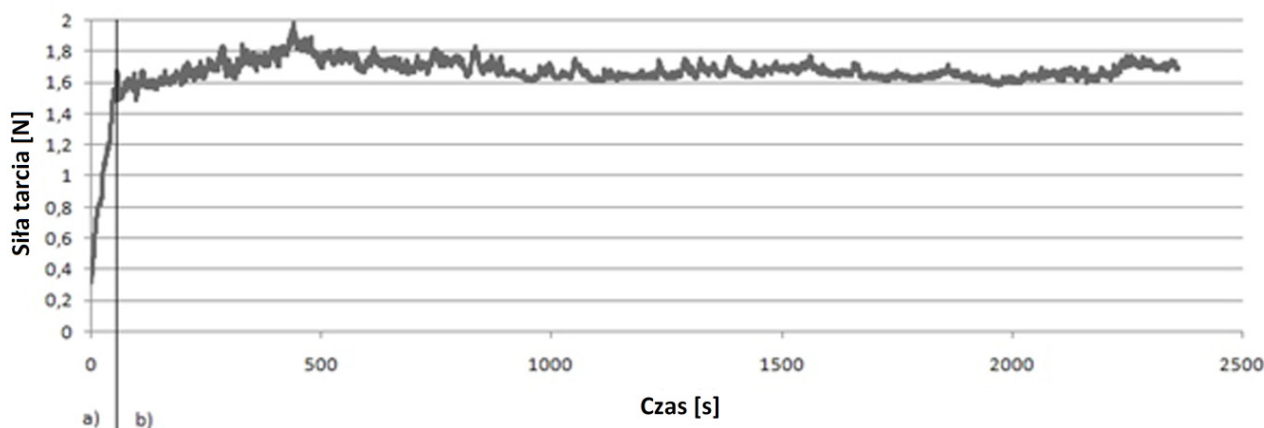
Pozwala to na obliczenie objętości zużytego materiału:

$$V = \pi \frac{b^4}{64R} \quad (3)$$

gdzie: R – promień kuli, oraz współczynnika szybkości zużywania ściernego (K_C). Wykorzystać w tym celu należy równanie Archarda, które stosowane jest w przypadku tarcia suchego:

$$K_C = \pi \frac{b^4}{64RSN} \quad (4)$$

gdzie: S – droga tarcia, N – obciążenie. Zmierzone podczas badań wartości siły tarcia należy podzielić na dwie grupy: docieranie oraz badanie właściwe (Rys. 5).



Rysunek 5 Przykładowy pomiar wartości siły tarcia: a – docieranie, b – pomiar właściwy

Analizując wyniki, należy brać pod uwagę tylko okres, w którym wartość siły tarcia się ustabilizowała. Okres docierania należy w rozważaniach pominąć. Następnie, wyznaczając średnią oraz stosując prawo tarcia Amontonsa-Coulomba, obliczyć można wartość współczynnika tarcia:

$$\mu = \frac{\bar{F}}{N} \quad (5)$$

gdzie: \bar{F} – średnia wartość zmierzonej siły tarcia. Powyższe obliczenia należy wykonać dla każdego badania osobno, wykorzystując równania (2) – (5).

3. WYNIKI PRZYKŁADOWYCH BADAŃ

Opisana powyżej metoda została przetestowana. Jako obiekt badań wykorzystano okładziny cierne popularnego w Polsce ciągnika. Wycięto z nich walcowe próbki o średnicy 1" i wysokości 10 mm. Przygotowano 10 takich próbek. Dla każdej próbki badania powtórzone trzykrotnie, co dało łącznie 30 prób. Przykładowy krater powstały w wyniku tarcia przedstawiono na Rysunku 6.



Rysunek 6 Zdjęcie mikroskopowe jednego z kraterów powstałego podczas badań

Można zauważyć, że wskutek niejednorodności materiału granica krateru jest nieregularna. Pomiarów wielkości b1 i b2 dokonywano zawsze do najdalej wysuniętych punktów. Wykorzystując wzory (4) i (5), wyznaczono średnią wartość współczynnika tarcia badanego skojarzenia oraz współczynnik szybkości zużywania ściernego. Wykorzystując zależność:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}{m-1}} \quad (6)$$

obliczono wartości odchylenia standardowego obu parametrów. Wyniki przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2 Wyniki przykładowych badań

| | Współczynnik tarcia | Współczynnik szybkości zużywania ściernego [10 ⁻¹³ m ³ N ⁻¹ m ⁻¹] |
|------------------------|---------------------|--|
| Wartość średnia | 0,41 | 1,458 |
| Odchylenie standardowe | ±0,016 | ±0,031 |

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W niniejszej pracy zaproponowano wykorzystanie metody Ball-Cratering do badań okładzin ciernych hamulców maszyn rolniczych. Stwierdzono że:

- prawidłowe zaprojektowanie eksperymentu wymaga badań przedwstępnych pozwalających wstępnie dobrać zakresy wartości parametrów eksperymentu;
- wykorzystując metodę optymalizacji procesów Taguchi, można z powodzeniem wyznaczyć odpowiednie wartości parametrów eksperymentu właściwego;

– różnicę pomiędzy kontaktem rzeczywistej pary trącej a tej użytej w eksperymencie można zrekompenzować odpowiednim zaplanowaniem oraz odpowiednią liczbą powtórzeń.

Afiliacja

Finansowanie z Pracy Własnej nr MB/WM/4/2017, w ramach środków przeznaczonych na rozwój młodych naukowców z funduszu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

LITERATURA

- [1] Yang S., Dai S., A Glimpse at the Development and Application of Aluminum Alloys in Aviation Industry, *Materials Review*, 2005, 2, 68-72.
- [2] Kiniorska I., Wrońska-Kiczor J., Factors Affecting Sustainable Development of Agriculture and Rural Areas in the Świętokrzyskie Voivodship, *Barometr Regionalny*, 2015, 13 (1), 41-46.
- [3] Mellor J. W., *Agricultural Development and Economic Transformation*, Palgrave Studies in Agricultural Economics and Food Policy, Springer, Switzerland, 2015.
- [4] Yevtushenko A. A., Grzes P., 3D FE model of frictional heating and wear with a mutual influence of the sliding velocity and temperature in a disc brake, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2015, 62, 37-44.
- [5] El-Tayeb N. S. M., Liew K. W., On the dry and wet sliding performance of potentially new frictional brake pad materials for automotive industry, *Wear*, 2009, 266, 275-287.
- [6] Kamiński Z., Experimental and numerical studies of mechanical subsystem for simulation of agricultural trailer air braking systems, *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 2013, 20 (4), 289-311.
- [7] Borawski A., Empirical research on the influence of friction material copper content on its tribological properties, *Proceedings of 24th International Conference "MECHANIKA 2019"*, 17 May 2019, Kaunas.
- [8] Puławski G., Szpica D., The modelling of operation of the compression ignition engine powered with diesel fuel with LPG admixture, *Mechanika*, 2015, 21 (6), 501-506.
- [9] Mieczkowski G., Optimization and prediction of durability and utility features of three-layer piezoelectric transducers, *Mechanika*, 2018, 24 (3), 335-342.
- [10] Szpica D., Modeling of the operation of a Dual Mass Flywheel (DMF) for different engine-related distortions, *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 2018, 24 (6), 643-660.
- [11] Borawski A., Suggested research method for testing selected tribological properties of friction components in vehicle braking systems, *Acta Mechanica et Automatica*, 2016, 10 (3), 223-226.
- [12] Yevtushenko A. A., Borawski A., Воздействие периода эксплуатации на избранные трибологические свойства тормозных колодок, *Journal of Friction and Wear*, przyjęte do druku.
- [13] Allsopp D. N., Trezona R. I., Hutchings I. M., The effects of ball surface condition in the micro-scale abrasive wear test, *Tribology Letters*, 1998, 5 (4), 259-264.
- [14] Cozza R. C., Influence of the normal force, abrasive slurry concentration and abrasive wear modes on the coefficient of friction in ball-cratering wear tests, *Tribology International*, 2014, 70, 52-62.
- [15] Fildes J. M., Mayers S. J., Kilaparti R., Schlepp E., Improved ball crater micro-abrasion test based on a ball on three disc configuration, *Wear*, 2012, 274-275, 414-422.
- [16] Polański Z., *Planowanie doświadczeń w technice*, PWN, Warszawa 1984.
- [17] Osuch-Słomka E., Ruta R., Słomka Z., The use of a modern method of designing experiments in ball-cratering abrasive wear testing, *Journal of Engineering Tribology*, 2013, 227, 1177-1187.
- [18] Stoycheva S., Marchese D., Paul C., Padoan S., Juhmani A., Linkov I., Multi-criteria decision analysis framework for sustainable manufacturing in automotive industry, *Journal of Cleaner Production*, 2018, 187, 257-272.
- [19] PN-EN 1071-6:2008 Advanced technical ceramics – Methods of test for ceramic coatings – Part 6: Determination of the abrasion resistance of coatings by a micro-abrasion wear test.