

Henryk CZARNECKI\*

## ANALIZA PROCESU ZUŻYWANIA PARY KINEMATYCZNEJ BRĄZ–ŻELIWO STOPOWE

### ANALYSIS OF THE PROCESS OF WEAR OF A BRONZE–ALLOY CAST IRON KINEMATIC PAIR

#### Słowa kluczowe:

tarcie suche, brąz–żeliwo

#### Key-words:

dry friction, bronze–cast iron

#### Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono wyniki badań zużycia pary kinematycznej brąz–żeliwo stopowe. Taka para ma zastosowanie w mechanizmach posuwowych (ślimak–zębatka ślimakowa) obrabiarek ciężkich. Eksperyment prowadzono dla tarcia suchego przy zmiennych twardościach żeliwa, naciskach jednostkowych i szybkości procesu tarcia. Określono zużycie obu elementów pary. Wyniki przedstawiono na wykresach i w postaci zależności na intensywność zużywania.

---

\* Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, 42-200 Częstochowa, Al. Armii Krajowej 21, tel. (034) 325 05 36 lub sekr. (34) 325 05 09; fax. (34) 325 05 09; e-mail: czarneck@itm.pcz.czest.pl

## WPROWADZENIE

W obrabiarkach ciężkich w mechanizmach posuwowych z uwagi na znaczne przenoszone moce do zamiany ruchu obrotowego na posuwowy często stosuje się mechanizm ślimak–zębatka ślimakowa. Specyfika tych obrabiarek powoduje, że obciążenia mechanizmów posuwowych mogą dochodzić do 300 kN, co skutkuje przy pełnym pokryciu współpracującego uzębienia zębataki i ślimaka naciskami jednostkowymi dochodzącymi do 45 MPa, a nawet dwukrotnie większymi przy niepełnym pokryciu.

Natomiast maksymalne prędkości ślizgania ślimaka względem zębataki, występujące przy przesuwach szybkich przekraczają wartość 3 m/s. Przy prawidłowych warunkach pracy występują one dla małych obciążeń (ruchy szybkie i ustawcze), zaś maksymalne naciski – przy mniejszych prędkościach (posuwach roboczych). Jednakże należy mieć na uwadze, że w chwili uruchomienia stołu napędzanego układem ślimak–zębatka, na skutek sił masowych i niedostatecznego smarowania naciski mogą osiągnąć wartości bliskie maksymalnych. Również warunki tarcia w przekładni ślimak–zębatka są wówczas bardzo niekorzystne ze względu na brak wytwarzanego filmu olejowego i są zbliżone do warunków tarcia półsuchego lub suchego. W większości przypadków producenci takich obrabiarek zębataki wykonują z żeliwa stopowego o twardościach 220–280 HB, a ślimak najczęściej z brązu aluminiowo-żelazowego  $CUAl9Fe3$ . Na żywotność takiej pary kinematycznej istotny wpływ ma dobór właściwej twardości żeliwa i stąd na wniosek producenta takich obrabiarek postanowiono przeprowadzić próby stanowiskowe w celu określenia procesu zużywania w warunkach tarcia suchego i mieszanego. W niniejszym opracowaniu zostaną przedstawione wyniki dla tarcia technicznie suchego [L. 1, 2, 4].

## METODYKA PROWADZENIA BADAŃ STANOWISKOWYCH I WYNIKI BADAŃ

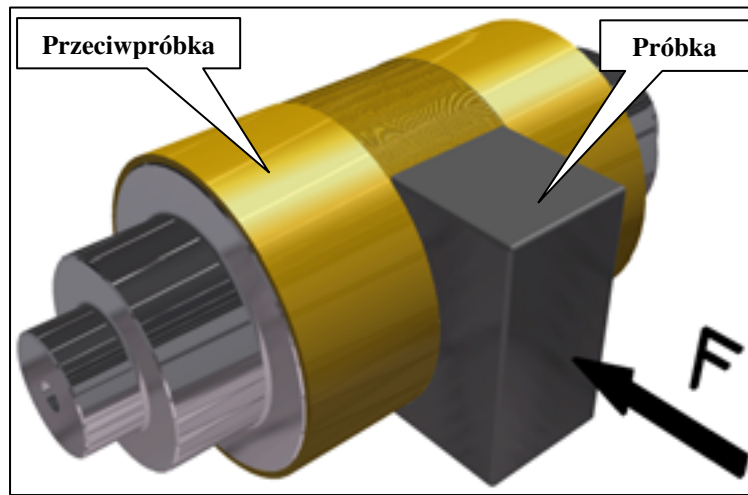
Badania stanowiskowe wykonano na specjalnym urządzeniu, zaprojektowanym i wykonanym w Instytucie TMiAP, które przystosowano do tokarki TR-55, przy czym napęd w obrabiarence zamieniono na bezstopniowy. Urządzenie umożliwiło uzyskanie dowolnych nacisków, zapewniło dobre przyleganie powierzchni zużywanych i powtarzalności położenia próbki wyjmowanej do pomiaru, a ponadto eliminowało możliwość powstawania drgań.

W celu określenia wpływu twardości żeliwa na jego zużycie przeprowadzono pomiary twardości losowo wybranych zębatek pobranych z bieżącej produkcji, a następnie wykonano próbki z żeliwa o twardościach skrajnych i twardości najczęściej stosowanej. Twardości próbek wynosiły  $220 \pm 5$ ;  $240 \pm 5$  i  $280 \pm 5$  HB.

Próbka wykonywana z badanego żeliwa miała kształt prostopadłościanu o powierzchni styku  $50 \text{ mm}^2$ . Przed badaniami każda próbka była dodatkowo obrabiana w celu jej dopasowania do współpracującej powierzchni przeciwpróbki.

Przeciwpróbkę stanowiła tuleja cylindryczna z brązu. CuAl9Fe3 osadzona na specjalnym, sztywnym trzpieniu, zamocowanym we wrzecionie i podparta konikiem.

Widok układu kinematycznego próbki i przeciwpróbki zastosowanego w badaniach stanowiskowych przedstawia **Rys. 1**.



**Rys. 1.** Schemat analizowanego węzła tarcia

Fig. 1. Schematic of the friction pair

Wartości dopuszczalnych prędkości i nacisków dla badań modelowych określono na podstawie analizy rozwiązań konstrukcyjnych takich obrabiarek oraz zaleceń literaturowych dla pary brąz BA 93–żeliwo stopowe, z jakich wykonane są ślimak i zębátka [L. 2, 5]. Do badań przyjęto prędkość ślizgania  $v = 2\text{--}3 \text{ m/s}$  i wyrywkowo  $4\text{--}5 \text{ m/s}$  oraz naciski jednostkowe  $p = 25$  i  $50 \text{ MPa}$ .

Dla zapobieżenia wzrostu temperatury w strefie tarcia i usuwania produktów zużycia zastosowano chłodzenie 5-procentowym roztworem wodnym dwuchromianu potasu. Ciecz ta nie powoduje istotnych zmian w procesie zużycia w porównaniu z tarcieniem w otoczeniu samego powietrza, a zapewnia stałość temperatury procesu oraz stabilny przebieg procesu zużywania [L. 3, 6].

Pomiar wartości zużycia próbki był realizowany na pionowym długościomierzu przez określenie zmian długości próbki, a do pomiaru zużycia przeciwpróbki zastosowano czujnik zegarowy o działce elementarnej 0,001 mm. Bazą odniesienia była sąsiednia nienaruszona powierzchnia cylindryczna. Pomiaru dokonywano z pięciokrotnym ich powtórzeniem, a jako wynik przyjmowano wartość średnią.

Na podstawie prób wstępnych określono minimalne wartości zużycia próbek żeliwnych na poziomie 500  $\mu\text{m}$ , po których można było przerwać zużywanie. Wielkość ta wynikała z dopuszczalnych luzów w analizowanym układzie napędowym posuwu. Określenie wartości zużycia dokonywano zarówno dla próbki, jak i przeciwpróbki równocześnie.

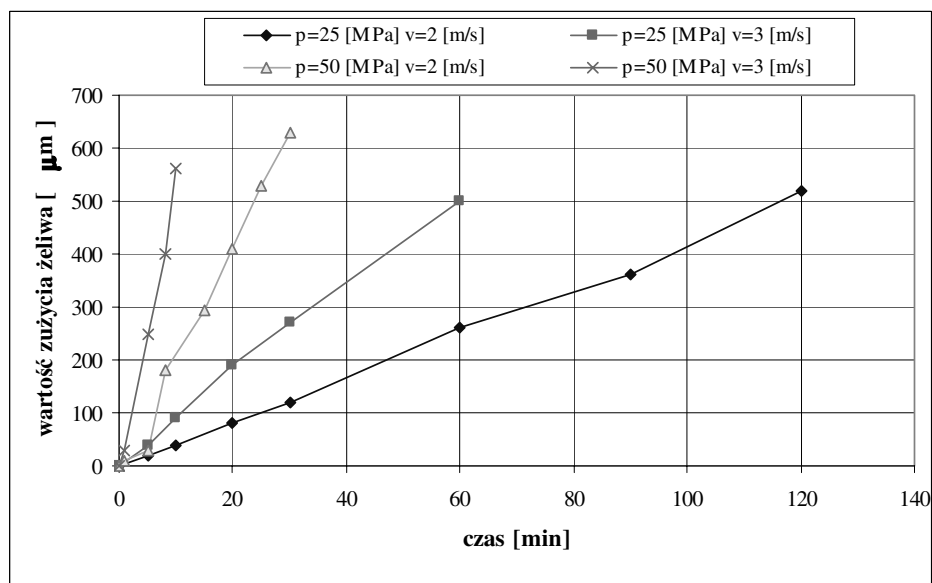
Badania procesu realizowano przy zmiennych parametrach tarcia, tj. obciążeniu jednostkowym i szybkości dla każdej z trzech twardości próbki. Ponadto dla danego obciążenia zmieniano szybkości. Otrzymano przebiegi zużywania w czasie dla tych danych jako średnią z trzech powtórzeń poszczególnego eksperymentu. Obciążenia analizowane to 25, 50, 75 i 100 MPa. Natomiast szybkości procesu tarcia 2, 3, 4 i 5 m/s [L. 1].

Przykładowe wyniki zużycia uzyskane w ramach przeprowadzonego eksperymentu przedstawiono na **Rys. 2** dla próbek i dla przeciwpróbek na **Rys. 3**.

Obserwujemy, że wraz ze wzrostem obciążenia i szybkości następuje wzrost zużycia próbki żeliwnej. Przeciwpróbka w tym czasie również wykazuje zwiększoną wartość zużycia w czasie realizacji procesu, co obrazuje **Rys. 3**.

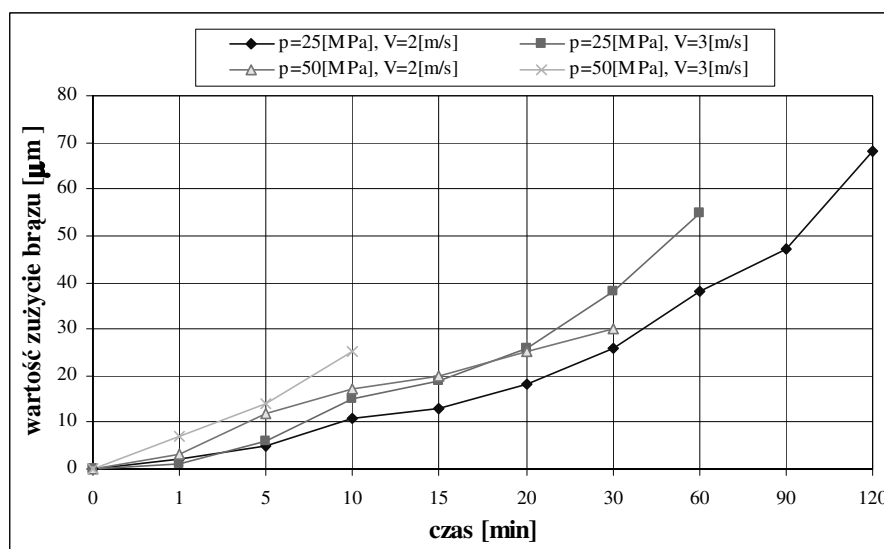
Przebiegi zużycia próbek i przeciwpróbek dla pozostałych twardości są podobne do tych zaprezentowanych, zmienia się tylko ich wartość.

Stąd na histogramach przedstawiono wpływ twardości żeliwa na proces tarcia i osiągnięcia zużycia o wartości 500  $\mu\text{m}$  (**Rys. 4**) oraz 50  $\mu\text{m}$  dla przeciwpróbki, czyli brązu zobrazowano na histogramach **Rys. 4 i 5**.



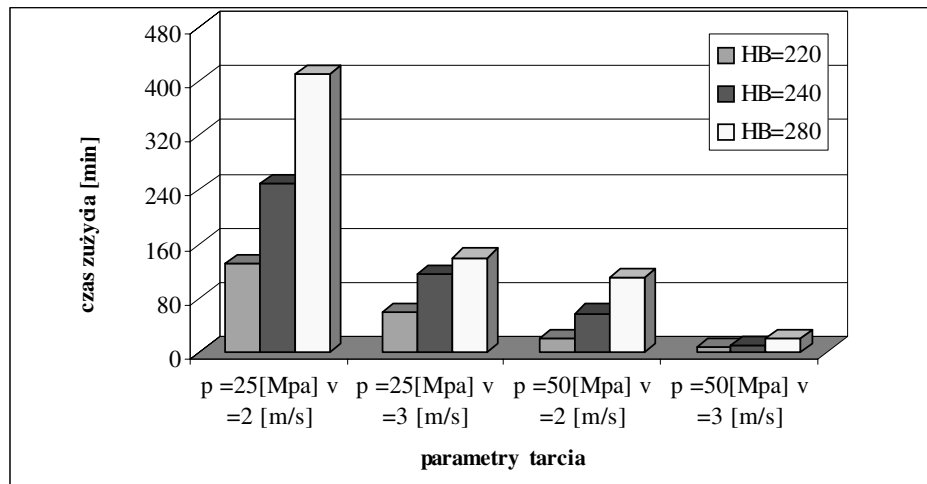
**Rys. 2. Przebieg zmiany wartości zużycia żeliwa o twardości 220 HB po czasie tarcia dla zmiennych nacisków jednostkowych  $p$  i szybkości  $v$**

Fig. 2. Variation of the magnitude of wear of cast iron of a hardness of 220 HP after the friction time for variable pressure units,  $p$ , and velocities,  $v$



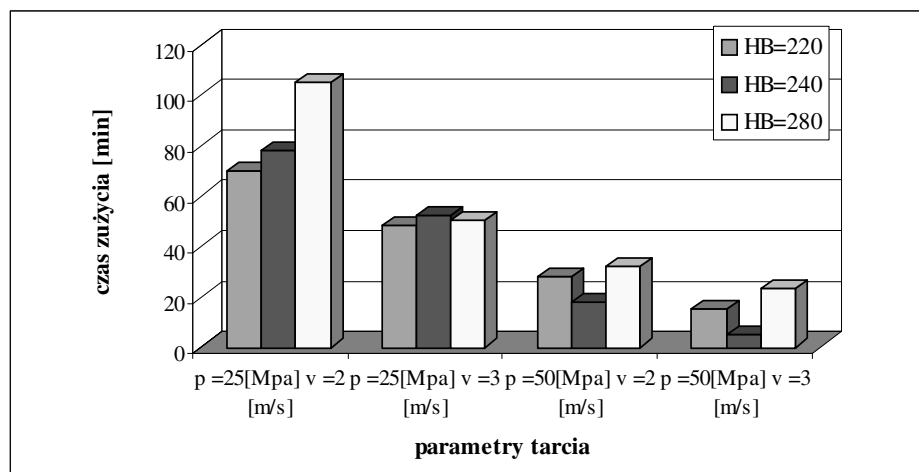
**Rys. 3. Przebieg zmiany wartości zużycia brązu po czasie tarcia dla zmiennych nacisków jednostkowych  $p$  i szybkości  $v$**

Fig. 3. Variation of the magnitude of wear of bronze after the friction time for variable pressure units,  $p$ , and velocities,  $v$



**Rys. 4. Czas osiągnięcia zużycia 500 μm dla zmiennej twardości żeliwa HB przy zmiennych parametrach procesu tarcia**

Fig. 4. Time of reaching a wear of 500 μm for variable cast-iron HB hardness with variable friction process parameters



**Rys. 5. Czas osiągnięcia zużycia 50 μm dla zmiennej twardości żeliwa HB przy zmiennych parametrach procesu tarcia**

Fig. 5. Time of reaching a wear of 50 μm for variable cast-iron HB hardness with variable friction process parameters

Na przedstawionych histogramach możemy zaobserwować, iż wzrostowi twardości żeliwa stopowego towarzyszy zwiększenie jego odporności na zużywanie we wszystkich rozpatrywanych przypadkach. Zwiększenie szybkości procesu tarcia powoduje zwiększenie zużycia. Podobnie przebiega zużywanie przeciwpróbki.

Na podstawie przeprowadzonych badań dokonano również określenia wpływu prędkości ślizgania, obciążenia jednostkowego oraz twardości próbki żeliwnej na intensywność zużywania się elementów pary trącej przez wyznaczenia zależności doświadczalnej określającej ten wpływ. Najwygodniejszą postacią takiego wzoru jest równanie potęgowe, które przyjmie postaci:

$$I = \frac{V}{t} = C \cdot v^a \cdot p^b \cdot HB^c,$$

gdzie:

- I – średnia intensywność zużycia,
- V – objętość startego materiału próbki lub przeciwpróbki do chwili uzyskania założonego łącznego zużycia liniowego,
- t – czas, w którym nastąpił ubytek objętości,
- C – współczynnik proporcjonalności, różny dla różnych materiałów, rodzaju tarcia i stosunku pól powierzchni trących,
- v – prędkość ślizgania,
- p – obciążenia jednostkowe,
- HB – twardość próbki żeliwnej,
- a, b, c – wykładniki potęgowe, określające wpływ poszczególnych czynników (v, p, HB).

W celu wyznaczenia zależności na intensywność procesu zużywania, z wykresów przebiegów zużycia odczytano czasy i obliczono odpowiadające im ubytki objętości. Następnie stosując metodę najmniejszych kwadratów określono wartości wykładników potęgowych, charakteryzujących wpływ poszczególnych czynników. Wyniki obliczeń przedstawiono poniżej w postaci równań:

- dla zużycia żeliwa przy tarcu suchym

$$I_Z = C_1 \cdot v^{2,5} \cdot p^{1,7} \cdot HB^{-4,5},$$

- dla zużycia brązu przy tarcu suchym

$$I_B = C_2 \cdot v^{1,7} \cdot p^{1,1} \cdot HB^{-1,0}.$$

W przypadku gdy chcemy wyznaczyć intensywność zużycia w odniesieniu do drogi tarcia, a nie – jak wyżej – do czasu, wówczas wykładniki potęgowe przy szybkości należałoby zmniejszać o wartość 1.

Należy zwrócić uwagę na to, że ze względu na dość duże rozrzuty przebiegów zużycia dokładność wyznaczonych wykładników potęgowych wynosi ok.  $\pm 10\%$ .

Równania powyższe są ważne dla omawianej pary trącej w zakresie parametrów prowadzonego eksperymentu, tj. prędkości ślizgania  $v = 1,5 \div 5$  m/s, nacisków  $p = 25 \div 100$  MPa i twardości żeliwa HB = 215  $\div$  285. Pozwalają nam bardziej jednoznacznie wnioskować o wpływie poszczególnych parametrów procesu na intensywność zużycia elementów pary tribologicznej. Zwiększając twardość żeliwa zmniejsza się zużycie obu elementów, co potwierdzają wcześniej przedstawione wykresy. Natomiast większe wartości wykładników potęgowych przy szybkości procesu jednoznacznie wykazuje, że ten parametr ma większy wpływ niż naciski jednostkowe.

Przedstawione wyniki eksperymentu wskazują jednoznacznie na konieczność wykonywania zębatek z żeliwa o wyższej twardości i jednorodnej na całym jej obszarze, najlepiej w granicach 280 HB. Zwracają również uwagę na większy wpływ prędkości niż obciążeń jednostkowych na proces zużycia. Biorąc pod uwagę, że większe prędkości występują przy posuwach szybkich, gdy obciążenia wynikają tylko z sił masowych, to nie powinny one mieć decydującego znaczenia na trwałość węzła. Natomiast maksymalne obciążenia w tych mechanizmach występują przy zdecydowanie mniejszych prędkościach, co jest korzystne dla zjawisk tribologicznych występujących w tym węźle kinematycznym. Stąd w produkcji zębatek należy zwrócić szczególną uwagę na właściwości stosowanego żeliwa, a w tym szczególnie na jego twardość.

## PODSUMOWANIE

Otrzymane wyniki stanowiskowych badań zużycia dla tarcia suchego pary ślimak–zębátka pozwalają na następujące stwierdzenia:

- Przy tarcu suchym z punktu widzenia odporności na zużycie zarówno zębátki, jak i ślimaka, wzrost twardości żeliwa, z którego wykonana jest zębátka, ma korzystny wpływ.
- Przy tarcu suchym na intensywność odniesioną do czasu zużycia obu elementów pary trącej większy wpływ ma prędkość ślizgania niż naciski.



## LITERATURA

1. Czarnecki H. i inni: Badanie zespołów obrabiarek i układów ślimak–zębátka stosowanych w obrabiarkach ciężkich, Materiały z badań, Instytut technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Materiały nie publikowane.
2. Tubielewicz K.: Technologia nagniatania żeliwnych części maszyn, seria monografie nr 69. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2000.
3. Czarnecki H., Tubielewicz K.: Sposoby i metodyka pomiaru wielkości zużycia w stanowiskowych badaniach tribologicznych, W materiałach 13 konferencji krajowej i 4 międzynarodowej „Metrologia w Technikach Wytwarzania” Żerków 2009, s. 77–82.
4. Laber S.: Analiza Współzależności pomiędzy stanem warstwy wierzchniej a właściwościami użytkowymi żeliwnych elementów maszyn obrabianych nagniataniem. Monografia 32. WSInż., Zielona Góra 1985.
5. Wrotny L.T.: Projektowanie obrabiarek, WNT, Warszawa 1973.
6. Tatar K., Tubielewicz K., Wieczorek A.: Tribologiczne właściwości warstwy wierzchniej żeliwa stopowego po różnych technologiach obróbki wykańczającej. XIX Szkoła Tribologiczna Częstochowa – Kokotek 1994.

**Recenzent:**  
**Stanisław LABER**

## Summary

**The paper presents the results of tests on the wear of a bronze–alloy cast iron kinematic pair. Such a kinematic pair is applied in the feed mechanisms (worm – worm rack) of heavy machine tools. The experiment was conducted for dry friction with variable cast iron hardness values, unit pressures, and friction process rates. The wear of each element of the pair was determined. The results are presented in diagrams and in the form of wear intensity relationships. It has been found that the increase in alloy cast-iron hardness reduces the magnitude of wear of both pair elements. Moreover, the wear intensity relationship indicates that the process rate influences the wear magnitude more strongly than the unit pressure does, which is advantageous for this system, since increased loads in this mechanism are accompanied by lower loads.**

