

Zbigniew STANIK, Andrzej KUBIK, Henryk BĄKOWSKI

## ANALIZA ZUŻYCIA STALI BAINITYCZNEJ W SKOJARZENIU ŚLIZGOWYM W WYBRANYCH WARUNKACH EKSPLOATACJI NA STANOWISKU T-05 (ROLKA - KLOCEK)

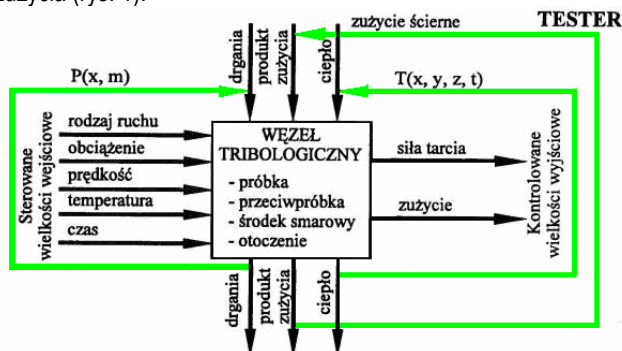
### Streszczenie

W artykule przedstawiona została analiza skojarzenia ślizgowego w różnych warunkach eksploatacji. W pracy przedstawiono wpływ prędkości oraz obciążenia na zużycie i współczynnik tarcia, stali o strukturze bainitycznej w skojarzeniu ślizgowym oraz graficzną interpretację wyników badań na podstawie uzyskanych rezultatów z przeprowadzonych badań doświadczalnych i metalograficznych.

### WSTĘP

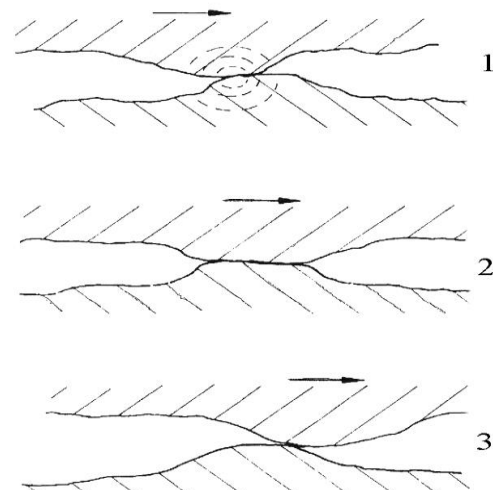
Zjawisko tarcia jest jednym z najpowszechniejszych zjawisk w technice. Oddziaływanie tarcia może wywołać zarówno skutki pozytywne (np. zastosowanie sprzężenia cierne w różnego rodzaju układach sprzęgłowych czy układach hamulcowych) ale i również skutki negatywne (np. opory ruchu ślizgania lub toczenia w różnego rodzaju przekładniach zębatych, łożyskach, czy też prowadnicach)[1].

Proces tarcia jaki zachodzi w układach tribomechanicznych wywołuje straty energetyczne, jak i straty wywołane procesem zużycia (rys. 1).



Rys. 1. Zależność: wejścia-wyjścia w teście tribologicznym [2]

Warstwa wierzchnia ciał stałych różniąc się budową i własnościami od materiału w całej objętości ciała stałego, jest bezpośrednim uczestnikiem procesów tribologicznych. Tworzy się ona i modyfikuje pod wpływem oddziaływań zewnętrznych podczas obróbki materiału oraz w procesie tarcia. Prawidłowo ukształtowana warstwa wierzchnia zapewnia optymalne własności tribologiczne w czasie eksploatacji. Jednym z rodzajów tarcia jest tarcie ślizgowe, zaliczane do tarcia suwnego, które występuje na styku dwóch ciał stałych, podczas gdy ciała przesuwają się lub spoczywają względem siebie. Przy tarcu zewnętrznym (np. ślizgowym) występująca siła dąży do przesunięcia jednego z ciał. Tarcie ślizgowe występuje, gdy w miejscu styku ciał przenoszona jest siła nacisku i towarzyszy temu wiele zjawisk występujących w na powierzchni tarcia oraz tuż pod nią. przy tarcu suchym, przy którym nie występuje między współpracującymi elementami żaden środek smarny oraz ciała obce, intensywność tarcia rośnie wraz ze wzrostem chropowatości powierzchni, towarzyszy temu zjawisku wydzielanie się dużej ilości ciepła co powoduje spadek wytrzymałości i wzrost zużycia się części [3].



Rys. 2. Schemat kolejnych etapów rozwoju zjawisk kontaktowych podczas tarcia [1]: 1 – etap odkształceń sprężystych i plastycznych, 2 – etap rozwoju adhezji, 3 – etap ścinania materiału i odkształceń sprężystych [4]

Jednym z niezwykle ciekawych zagadnień jest współpraca kół par zębatych w hydraulicznych silnikach satelitowych typ SM. Przeznaczone są do napędu urządzeń mechanicznych, stosowanych szczególnie w przemyśle górniczym. Z uwagi na możliwości zasilania ich różnymi rodzajami cieczy, w tym cieczami ekologicznymi obszar zastosowań silników tego typu może być bardzo szeroki np. w sektorze spożywczym, rolniczym i w wielu innych dziedzinach przemysłu [5].



Rys. 3. Hydrauliczny silnik satelitowy typu SM: a) widok ogólny, b) zespół napędowy [5]

Na powierzchni zespołu napędowego silnika hydraulicznego można zaobserwować liczne procesy zużycia. W celu wydłużenia czasu eksploatacji zostały podjęte wstępne badania tribologiczne na stanowisku typu rolka-klocek (T-05). Materiałem eksperymentalnym zastosowanym do badań była stal bainityczna o twardości ok. 400 HB. Ze względu na dużą wytrzymałość zmęczeniową możliwa była obserwacja wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych (obciążenie, prędkość) na zachodzące procesy zużycia pomiędzy współpracującymi powierzchniami. Badania główne pozwalające na wyjaśnienie mechanizmów zużycia oraz pozwalające na wybór optymalnego materiału, który wydłużyłby czas eksploatacji będą obejmować badania w styku toczno-ślizgowym. W wyniku przeprowadzenia badań tribologicznych oraz metalograficznych określono intensywność zużycia oraz współczynnik tarcia. Obciążenia oraz prędkości zostały dobrane tak, aby umożliwiły odzwierciedlenie warunków rzeczywistych panujące w tym skomplikowanym węzle kinematycznym.

## 1. PRZEBIEG BADAŃ

### 1.1. Materiał i urządzenia wykorzystane w badaniach

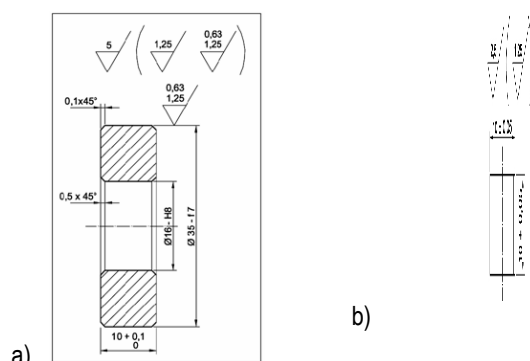
Badania tribologiczne zostały przeprowadzone na stanowisku rolka-klocek (T-05). Do badań wykorzystano próbkę wykonaną ze stali bainitycznej, o składzie chemicznym i właściwościach przedstawionych w tabeli 1 i 2. Jako przeciwpróbkę zastosowano stal 100Cr6 ze względu na neutralność w procesie zużycia. Wymiary próbek i przeciwpróbki przedstawiono na rysunku 4.

Tab. 1. Analiza wytopowa stali o strukturze bainitycznej [7]

C	Mn	Si	P	S	Cr	V	Mo
0,19	1,91	0,16	0,017	0,008	1,47	0,34	0,34

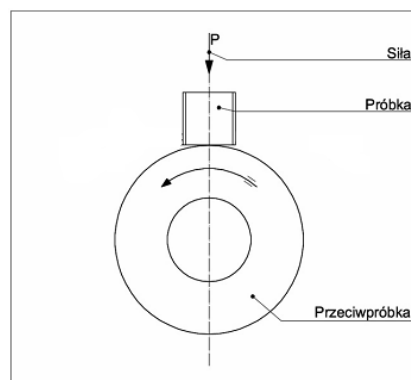
Tab. 2. Zestawienie wybranych właściwości mechanicznych stali bainitycznej [7]

Rm	Re	As	Twardość
MPa	MPa	%	HB
1204	850	13,1	~380



Rys. 4. Wymiary przeciwpróbki (a) i próbki (b)

Skojarzenie ślizgowe zostało przedstawione na rysunku 5.



Rys. 5. Węzeł tribologiczny rolka-klocek

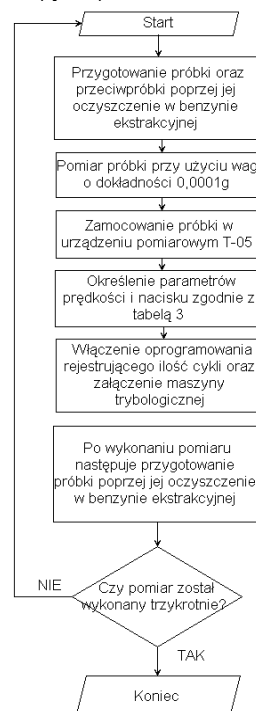
Strukturę próbki wykorzystywanej do badań w skojarzeniu ślizgowym stanowił bainit (rys. 6). Do badań mikroskopowych został wykorzystany mikroskop metalograficzny OLYMPUS CK40M. Służy on do obserwacji powierzchni płaskich w świetle odbitym (rys. 7). W badaniach zostało użyte powiększenie śladów zużycia: x50, x500.



Rys. 6. Zgląd metalograficzny próbki wykonanej ze stali bainitycznej  
Rys. 7. Mikroskop metalograficzny firmy Olympus CK40M

### 1.2. Schemat blokowy badań

W celu przeprowadzenia badań zaprojektowany został następujący przebieg badań (rys. 8)



Rys. 8. Schemat blokowy przeprowadzonych badań [6]

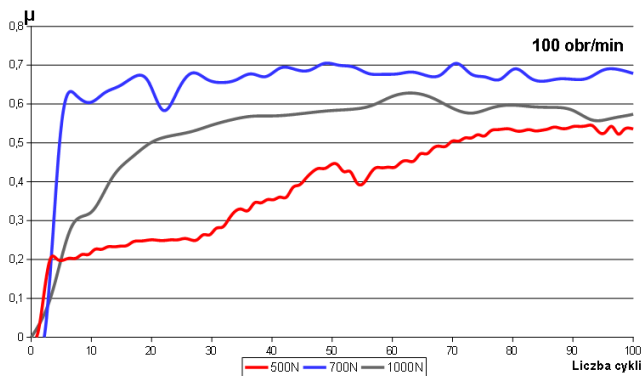
**2. BADANIA WŁASNE**

**2.1. Badania tribologiczne**

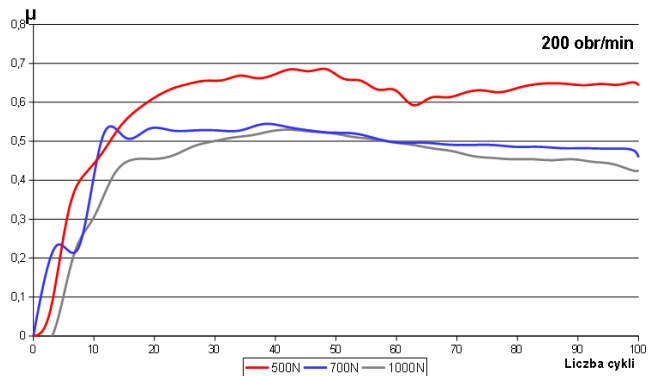
Podczas badań wykorzystano urządzenie do badań typu T-05 pracujące w układzie rolka-kłosek. Podczas badań rejestrowano ubytek masy (rys. 12, 13, 14) i współczynnik tarcia.

Na rysunkach 9, 10, 11 przedstawiono graficzną interpretację wpływu współczynnika tarcia ( $\mu$ ) dla różnych wartości obciążeń przy stałych prędkościach obrotowych.

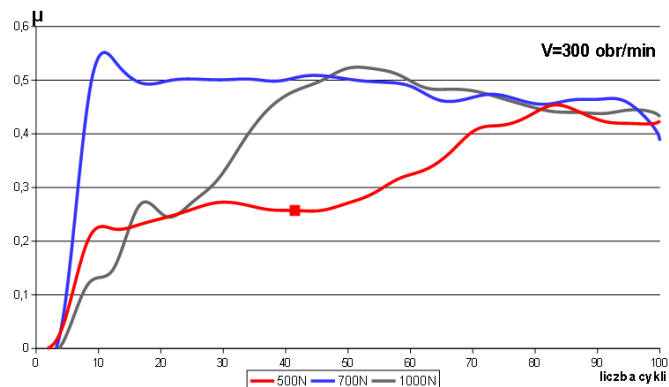
Na rysunku 9 zaobserwowano, że przy obciążeniu 500 N współczynnik tarcia jest bardzo niski natomiast wraz ze wzrostem obciążenia współczynnik ten wzrasta. Zatarcie następowało podczas nagłego skoku współczynnika tarcia przy wzmagającym metalicznym dźwięku, który najlepiej ilustruje to rys. 11 przy obciążeniu 700 N gdzie zaobserwowano wzrost współczynnika a następnie jego spadek. Podyktowane to jest pojawieniem się zjawiska zatarcia, w miejscu styku, a następnie tworzenia się warstwy tlenków na skutek podwyższonej temperatury.



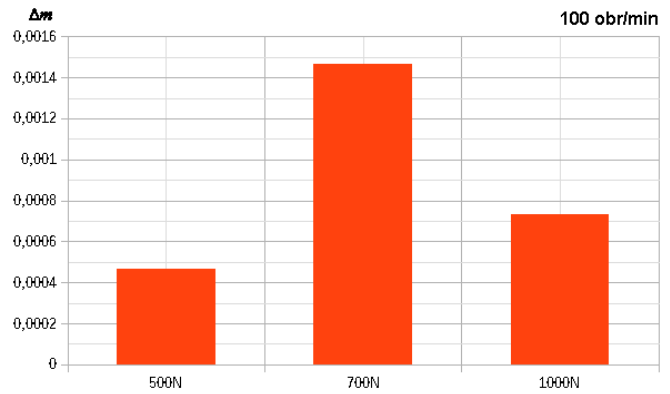
**Rys. 9.** Zależność współczynnika tarcia ( $\mu$ ) dla różnych obciążeń przy stałej prędkości  $n=100\text{obr/min}$



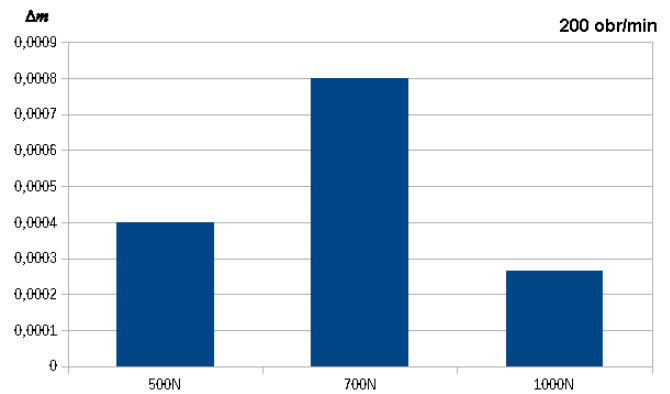
**Rys. 10.** Zależność współczynnika tarcia ( $\mu$ ) dla różnych obciążeń przy stałej prędkości  $n=200\text{obr/min}$



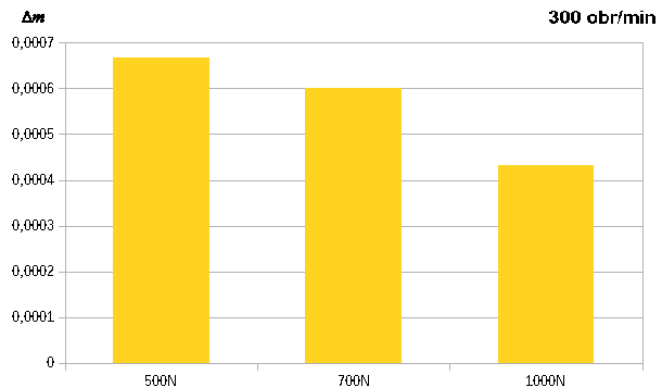
**Rys. 11.** Zależność współczynnika tarcia ( $\mu$ ) dla różnych obciążeń przy stałej prędkości  $n=300\text{obr/min}$



**Rys. 12.** Zestawienie ubytków masy dla różnych obciążeń przy stałej prędkości obrotowej  $100\text{obr/min}$



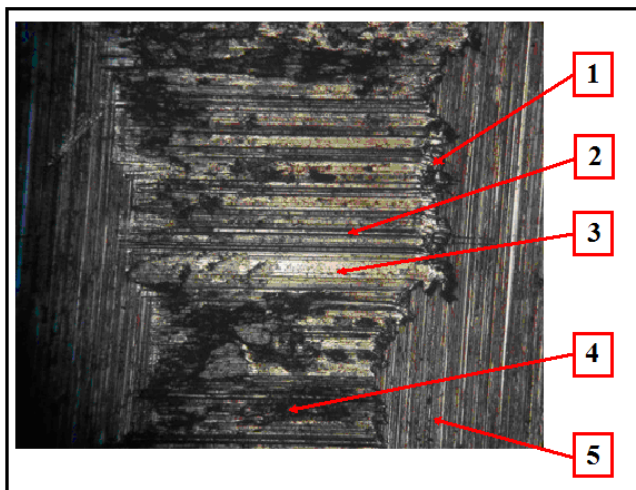
**Rys. 13.** Zestawienie ubytków masy dla różnych obciążeń przy stałej prędkości obrotowej  $200\text{obr/min}$



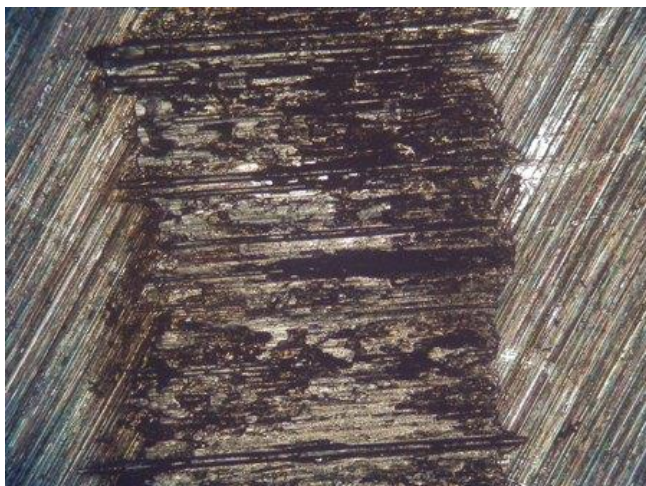
**Rys. 14.** Zestawienie ubytków masy dla różnych obciążeń przy stałej prędkości obrotowej  $300\text{obr/min}$

**2.2. Badania metalograficzne**

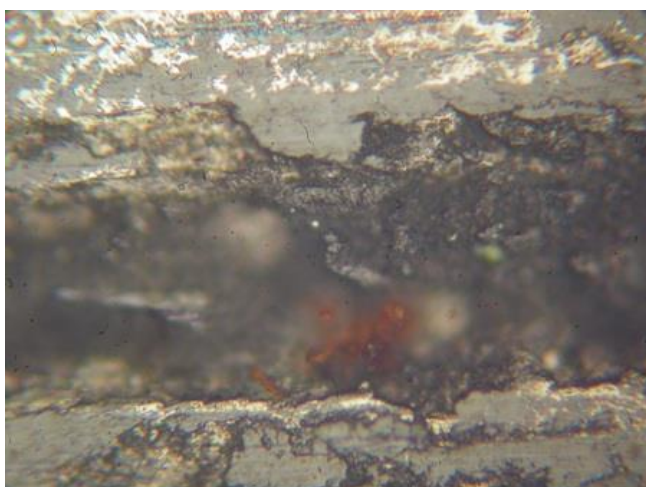
Badania metalograficzne umożliwiają określenie struktury, wtrąceń, nieciągłości i obserwacje powierzchni oraz określenie rodzaju zużycia i jego intensywności. Badania mikroskopowe pastylek zostały wykonane mikroskopem OLYMPUS przy powiększeniu x50, x500. Poniższe rysunki przedstawiają wybrane zdjęcia, które ukazują nam zużycie i ślad jaki pozostawiła przeciwpółka na próbce, odpowiednio dla trzech prędkości obrotowych.



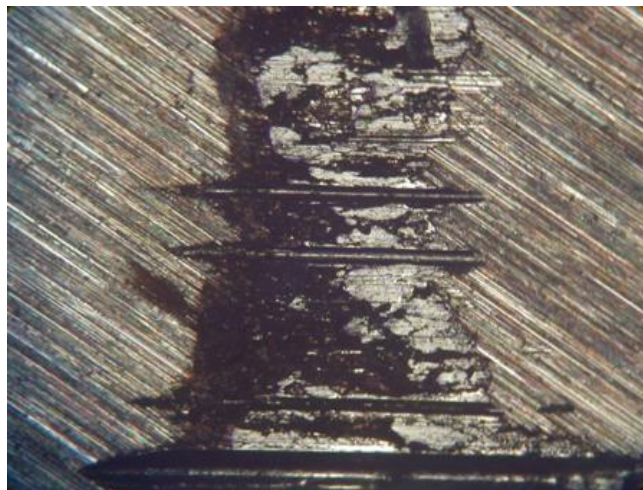
**Rys. 15.** Opis powierzchni tarcia po współpracy w skojarzeniu ślizgowym: 1 - krawędź pomiędzy strukturą powierzchni gładkiej i powierzchni poddanej obciążeniu z widocznym nawarstwieniem, 2 - wgłębienia, 3 - powierzchnia jednolita z widocznym wygładzeniem, 4 - warstwa tlenków, 5 - powierzchnia pierwotna (obszar gładki z widocznymi liniami po szlifowaniu)



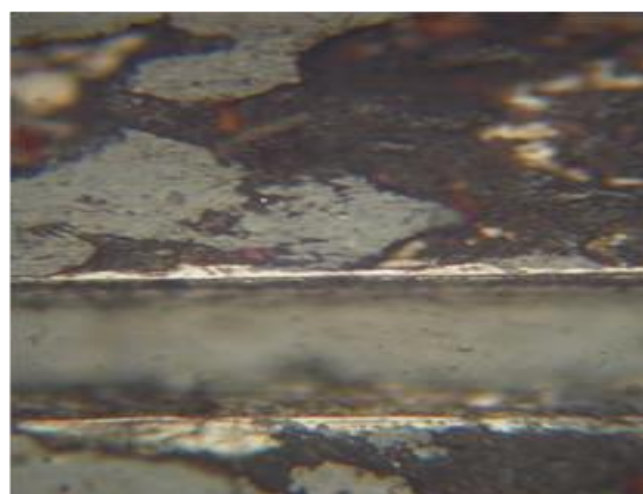
**Rys. 16.** Powierzchnia tarcia po współpracy dla obciążenia 500 N przy prędkości 100 obr/min, powiększenie: x50



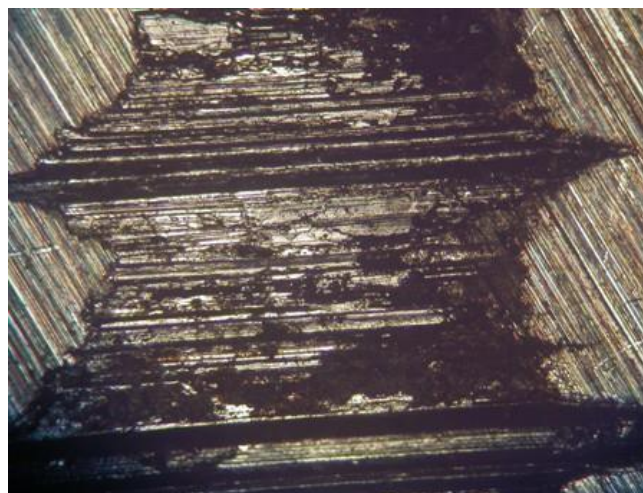
**Rys. 17.** Powierzchnia tarcia po współpracy dla obciążenia 500 N przy prędkości 100 obr/min, przy powiększeniu: x500



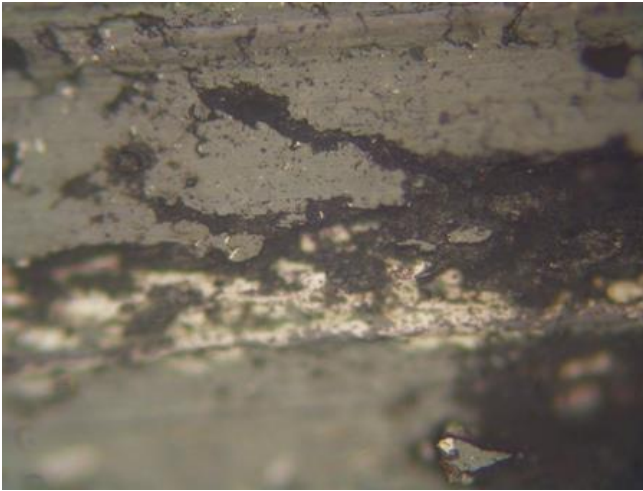
**Rys. 18.** Powierzchnia tarcia po współpracy dla obciążenia 700 N przy prędkości 100 obr/min, przy powiększeniu: x50



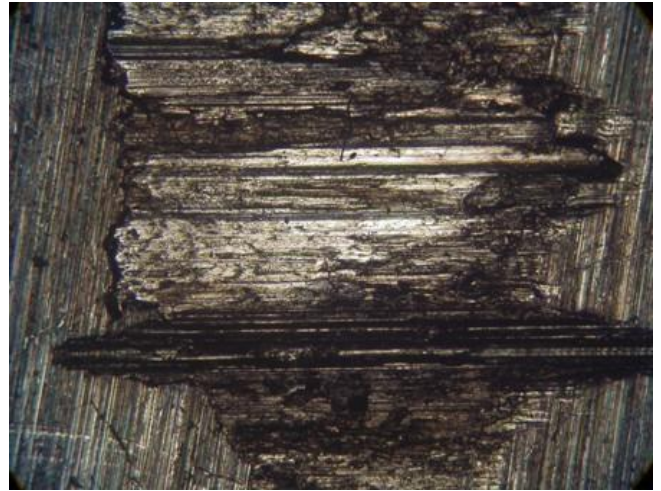
**Rys. 19.** Powierzchnia tarcia po współpracy dla obciążenia 700 N przy prędkości 100 obr/min, przy powiększeniu: x500



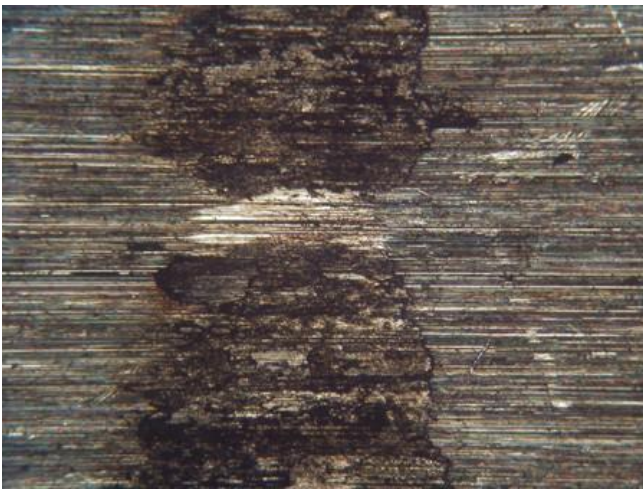
**Rys. 20.** Powierzchnia tarcia po współpracy dla obciążenia 1000 N przy prędkości 100 obr/min, przy powiększeniu: x50



**Rys. 21.** Powierzchnia tarcia po współpracy dla obciążenia 1000 N przy prędkości 100 obr/min, przy powiększeniu: x500



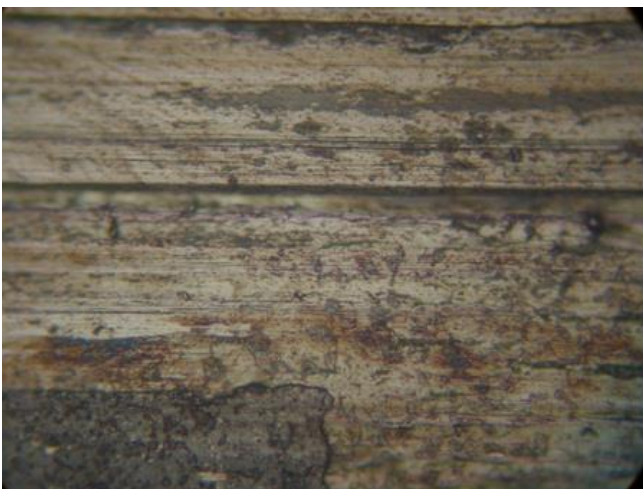
**Rys. 24.** Powierzchnia tarcia po współpracy dla obciążenia 700 N przy prędkości 300 obr/min, przy powiększeniu: x50



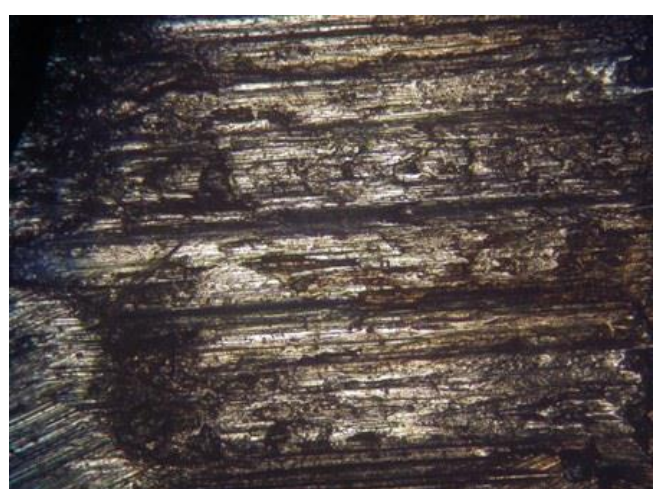
**Rys. 22.** Powierzchnia tarcia po współpracy dla obciążenia 500 N przy prędkości 300 obr/min, przy powiększeniu: x50



**Rys. 25.** Powierzchnia tarcia po współpracy dla obciążenia 700 N przy prędkości 300 obr/min, przy powiększeniu: x500



**Rys. 23.** Powierzchnia tarcia po współpracy dla obciążenia 500 N przy prędkości 300 obr/min, przy powiększeniu: x500



**Rys. 26.** Powierzchnia tarcia po współpracy dla obciążenia 1000N przy prędkości 300 obr/min, przy powiększeniu: x50



Rys. 27. Powierzchnia tarcia po współpracy dla obciążenia 1000N przy prędkości 300 obr/min, przy powiększeniu: x500

## PODSUMOWANIE

Testy przeprowadzone na stanowisku T-05 miały charakter wstępnych badań stanowiące preludium do zasadniczych badań, których celem będzie określenie optymalnego materiału do zastosowania w hydraulicznym silniku satelitowym. Wstępne badania umożliwiły określenie wpływu obciążenia i prędkości obrotowej na wybrane właściwości tribologiczne.

Badania mikroskopowe pozwoliły na obserwację powierzchni skojarzenia ślizgowego, które zostały przedstawione na rysunkach od 15 do 27. Na rysunkach w powiększeniu x50, można zaobserwować na powierzchni widoczne różnego rodzaju wyżłobienia, rowki i nieciągłości spowodowane oddziaływaniem na siebie elementów trących. Natomiast na rysunkach przy powiększeniu rzędu x500 widać dokładnie szczepienia i zrosty w mikroobszarach rzeczywistej powierzchni styku. Spowodowane to jest obciążeniami, jakimi została poddana próbka powodując przerwanie ochronnej warstewki tlenków prowadzące do zużycia adhezyjnego. Po zbliżeniu się występów nierówności do siebie nastąpiło ich szczepienie.

Analizując zmierzony ubytek masy uzyskany w wyniku badań tribologicznych stwierdzono, że przy prędkości 100 obr/min i wraz ze wzrostem obciążenia ubytek masy posiada krzywą paraboliczną i wynosi dla 500 N  $\Delta m=0,5$  mg, 700 N  $\Delta m=1,4$  mg, 1000 N  $\Delta m=0,53$  mg.

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski końcowe:

- przeprowadzając badania w układzie rolka-kłosek na stanowisku T-05 stwierdzono znaczny wpływ prędkości obrotowej oraz obciążenia na wartości i rodzaj zużycia,
- zużycie w skojarzeniu ślizgowym posiada charakter ściernadhezyjny, a jego intensywność zależy od parametrów eksploatacji,
- przy stałych prędkościach obrotowych wpływ obciążenia na ubytek masy ma postać krzywej parabolicznej wynikający z tworzenia się tlenków na powierzchni współpracy,

- dla wyższych prędkości obrotowych wpływ obciążenia jest odwrotnie proporcjonalny.

Praca została wykonana w ramach BK-244/RT1/2016.

## BIBLIOGRAFIA

1. Lawrowski Z. : Tribologia. Tarcie, zużycie i smarowanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2008.
2. Szczerek M. : Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2000.
3. Janecki J., Gołąbek S.: Zużycie części i zespołów pojazdów samochodowych. Wydawnictwa komunikacji i łączności, Warszawa 1974.
4. Hebda M, Wahal A.: Trybologia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1983.
5. <http://stosowaniemaszyn.pl/files/kat/SM.pdf> (15.10.2016r.).
6. Shipway P.H., Wood S.J., Dent A.H: The hardness and sliding wear behaviour of a bainitic steel. Wear 203-204 (1997) 196-205.
7. Bąkowski H.: Ocena procesów zużywania skojarzenia toczno-ślizgowego za pomocą płatkowych produktów zużycia. Monografia. Wydawnictwo Inter Media 2014.

## ANALYSIS OF WEAR THE BAINITIC STEEL IN SLIDING CONTACT FOR SELECTED OPERATED CONDITIONS ON T-05 STAND (ROLLER – BLOCK SYSTEM)

### Abstract

*The article presented an analysis of the sliding contact in different operating conditions. In this work showed the influence of speed and load on the wear and friction coefficient of steel with bainitic structure in sliding contact and graphical interpretation of the test results on the basis of the results obtained from the research and metallographic examination.*

Autorzy:

dr hab. inż. **Zbigniew Stanik** – Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Transportu, Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych, [zbigniew.stanik@polsl.pl](mailto:zbigniew.stanik@polsl.pl)

mgr inż. **Andrzej Kubik** – Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Transportu, Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych [andrzej.kubik@polsl.pl](mailto:andrzej.kubik@polsl.pl)

dr inż. **Henryk Bąkowski** – Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Transportu, Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych, [henryk.bakowski@polsl.pl](mailto:henryk.bakowski@polsl.pl)