

Warunki zatarcia dla pary ciernej stal-węglik wolframu (WC)

Seizure conditions for the friction pair steel-tungsten carbide (WC)

SŁOWA KLUCZOWE

proces zatarcia, para cierna, węgiel wolframu, WC

KEY WORDS

seizure process, friction steam, tungsten carbide, WC

Artur Rusowicz

Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

artur.rusowicz@pw.edu.pl

STRESZCZENIE

Przegląd literatury pokazuje wiele danych dotyczących istotnego wpływu warstw ceramicznych na zużycie współpracujących elementów maszyn. Wpływ ten jest korzystny zarówno w niskich jak i w podwyższonych temperaturach. Mało natomiast jest informacji na temat wpływu warstw ceramicznych na zjawisko zatarcia. Należy tu przewidywać działanie dwóch przeciwstawnych czynników. Z jednej strony większa odporność na ścieranie i wyższa temperatura topienia warstw ceramicznych niż stali, może prowadzić do podwyższenia odporności na zatarcie. Z drugiej strony mniejsze przewodnictwo cieplne w stosunku do przewodnictwa cieplnego stali, powoduje wzrost temperatury powierzchni elementów pozostających w kontakcie. Fakt ten prowadzi do szybszego niszczenia warstw granicznych i jednocześnie powoduje obniżenie właściwości smarnych oleju stosowanego do smarowania, powodując w konsekwencji zmniejszenie grubości tworzącego się filmu smarnego i obniżenie odporności na zacieranie. W związku z tym podjęto badania zacierania pary trybologicznej, którą stanowią walec stalowy i próbka stalowa pokryta warstwą ceramiczną.

SUMMARY

The literature review shows a lot of data on the significant influence of ceramic layers on the wear of cooperating machine elements. This effect is beneficial at both low and elevated temperatures. However, little information is available on the influence of ceramic layers on the seizure phenomenon. Two opposing factors should be expected here. On the one hand, higher abrasion resistance and a higher melting point of ceramic layers than for steel may lead to increased seizure resistance. On the other hand, the lower thermal conductivity in relation to the thermal conductivity of steel causes an increase in the surface temperature of the elements in contact. This fact leads to a faster destruction of the boundary layers and at the same time reduces the lubricating properties of the oil used for lubrication, resulting in a reduction in the thickness of the lubricating film formed and a reduction in the resistance to scuffing. Therefore, research was undertaken on the mashing of the tribological vapor, which is a steel cylinder and a steel sample covered with a ceramic layer.

Wstęp

W nowoczesnym przemyśle, i stosowanych w nim maszynach ceramika jest materiałem równie powszechnym jak materiały metaliczne. Co prawda nie możemy porównywać tych dwóch materiałów ilościowo, ale można zaryzykować stwierdzenie, że ceramika występuje w każdej nowoczesnej maszynie. Najpowszechniejszą formą wykorzystywania ceramiki są powłoki ceramiczne. Nakładanie powłok ceramicznych na elementy maszyn jest doskonałym rozwiązaniem, wydłużającym zdecydowanie czas ich pracy - zwłaszcza jeśli mówi się o współpracujących ze sobą elementach. Warstwy ceramiczne nakładają się także na elementy skrawające i elementy tnące. Poprawnie nałożona warstwa ceramiczna poprawia twardość materiału pierwotnego, zwiększa jego wytrzymałość mechaniczną, a nawet chroni przed korozją.

W literaturze natomiast niewiele jest informacji na temat tego, jak warstwy ceramiczne wpływają na zjawisko zatarcia, które najczęściej spowodowane jest brakiem prawidłowego smarowania pomiędzy współpracującymi pomiędzy sobą elementami maszyn. Artykuł jest

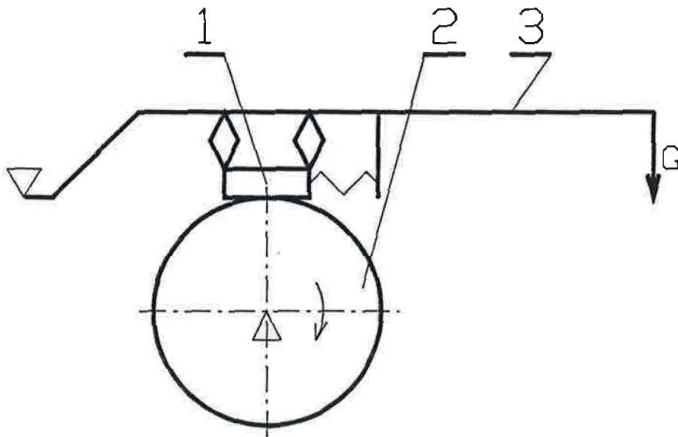
próbą odpowiedzi na to zagadnienie. W literaturze można spotkać korzystny wpływ ceramiki na smarowanie, gdyż w niektórych strukturach porowatych smar czy też olej lepiej się rozprzodkują. Z drugiej strony zmniejszone przewodnictwo cieplne ceramiki powoduje, że temperatura pracy jest wyższa, a z kolei wpływa na zmianę lepkości smaru.

W ramach badania postanowiono sprawdzić jak będzie wyglądało zjawisko zatarcia dla współpracujących ze sobą elementów wykonanych ze stali - bez żadnych warstw ochronnych, a także jak będzie ono wyglądało w przypadku, jak jeden z elementów stalowych zostanie natryśnięty warstwą węgliku wolframu (WC).

1. Stanowisko pomiarowe

Badania zatarcia prowadzono na udoskonalonym urządzeniu, które zaproponował dr inż. R. Wolff do badań wpływu kierunkowości struktury powierzchni na zacieranie, co było przedmiotem jego pracy doktorskiej [1]. W urządzeniu tym zastąpiono skokową zmianę ob-

ciężenia kontaktu przez nakładanie ciężarów na szalkę układem, który zapewniał powolny ustalony wzrost obciążenia kontaktu oraz zastosowano automatyczną rejestrację mierzonych parametrów. Wymieniono również pompę olejową, dostarczającą olej do strefy kontaktu. Schemat stanowiska pomiarowego został zaprezentowany na rysunku nr 1.

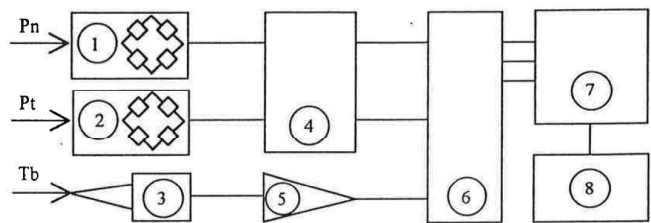


Rys. 1. Stanowisko pomiarowe

Nieruchoma płaska próbka (1) jest dociskana do obracającego się ze stałą prędkością walca (2), za pośrednictwem dźwigni (3), na końcu której, poprzez element podatny, zawieszono ciężar G , podparty podnośnikiem hydraulicznym. Wypuszczanie oleju z podnośnika hydraulicznego powodowało osiadanie ciężaru na szalce, a odpowiednio dobrana prędkość osiadania pozwalała na uzyskanie wzrostu obciążenia kontaktu. Ostrzowe podparcie próbki zapewnia jej dokładne przyleganie do powierzchni walca i równomierny rozkład na-5 cisków wzdłuż tworzącej walca. Do miejsca kontaktu próbki z walcem dostarczano olej Hipol EP-4 80W/90. Badania miały charakter porównawczy procesu zatarcia stali ze stalą oraz stali z różnymi warstwami ceramicznymi, którymi pokryto próbki stalowe. W tym wypadku badane było zatarcie pomiędzy stalą a powłoką z węgliku wolframu WC.

Zastosowana metoda powolnego, płynnego wzrostu obciążenia normalnego, stworzyła porównywalne warunki obciążenia dla wszystkich próbek. W badaniach użyto walce ze stali ŁH15 o chropowatości wzdłużnej $R_a=0,17 \mu\text{m}$. Wszystkie próbki miały również chropowatości wzdłużne, próbki ze stali 50 HSA o $R_a=2,6 \mu\text{m}$, próbki pokryte warstwą węgliku wolframu (WC) o $R_a=0,42 \mu\text{m}$.

Wszystkie pomiary rozpoczynano gdy temperatura stanowiska wyrównała się z temperaturą otoczenia $T=16-18^\circ\text{C}$ przy stałej prędkości poślizgu $v=12 \text{ m/s}$. Badania rozpoczynano od zerowej wartości siły normalnej i prowadzono do momentu zatarcia. Pomiary poszczególnych wielkości były rejestrowane przez zautomatyzowany układ pomiarowy, którego schemat przedstawia rys. 2.



1. dynamometr tensometryczny o zakresie do 2 kN,
2. dynamometr tensometryczny o zakresie do 1 kN,
3. termopara,
4. mostek - wzmacniacz tensometryczny firmy HBM,
5. wzmacniacz operacyjny - woltomierz V-544,
6. kaseca przetwornika analogowo-cyfrowego, 12 bitowa, 16 kanałowa
7. komputer PC,
8. oprogramowanie pomiarowo-rejestracyjne.

Rys. 2. Zautomatyzowany układ pomiarowy

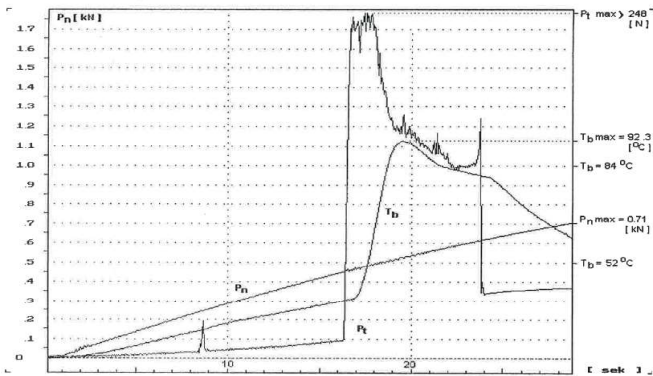
Komputer z oprogramowaniem umożliwił wykonywanie do 6500 pomiarów w każdym z trzech kanałów, z okresem próbkowania nie krótszym niż 1 ms.

2. Wyniki badań

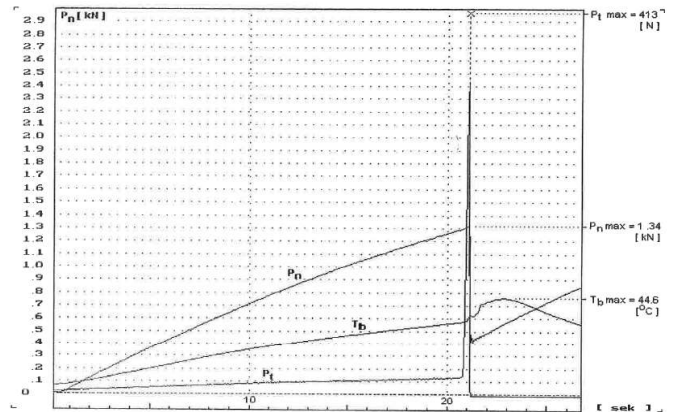
Badania wykonano dla dwóch różnych par ciernych. Wyniki badań przedstawiono na wykresach zmian obciążenia normalnego - P_n , oporów ślizgania - P_t i temperatury próbki - T_b , w funkcji czasu współpracy par ciernych.

Na rysunkach 3-9 przedstawiono przebiegi dla walca ze stali tożyskowej ŁH-15, współpracującego z próbkami ze stali 50 HSA. Przebiegi te zgodne są z przebiegami opisanymi w literaturze. Monotonicznemu wzrostowi siły normalnej P_n towarzyszył monotoniczny wzrost siły oporów ślizgania P_t i temperatury próbki T_b do chwili zatarcia. Zatarciu towarzyszył gwałtowny wzrost siły stycznej i załamanie krzywej wzrostu temperatury. Wielkość obciążenia zatarcia będąca siłą normalną P_n odpowiadała punktowi przecięcia stycznych do wykresu P_t bezpośrednio przed i po załamaniu wykresu. Obciążenie zatarcia P_n zmieniało się w zakresie $0,45+1,38 \text{ kN}$ natomiast maksymalna temperatura próbek zmianała się od $42,3^\circ\text{C}$ do $92,3^\circ\text{C}$. Próbkki wykazywały znaczne zużycie ściernie.

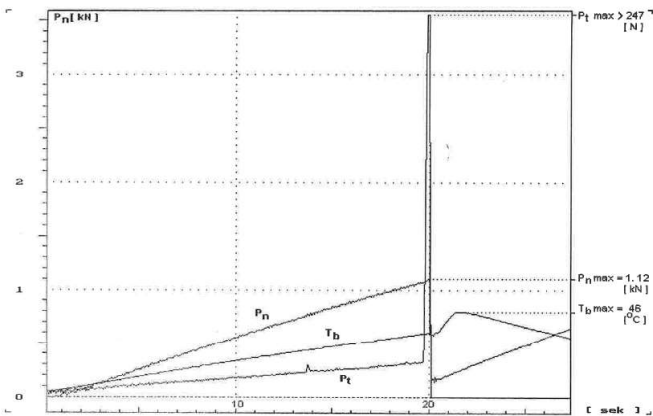
Na rysunkach 10-16 przedstawiono przebiegi zatarcia dla walca ze stali LH15 i próbek pokrytych warstwą węgliku wolframu (WC). Przebiegi te są podobne do przebiegów zatarcia stali, z tym, że załamanie wykresu siły oporów ślizgania jest łagodniejsze. Zatarcie próbek na rys. 10 i rys. 11 nastąpiło przy sile P_n odpowiednio $1,1 \text{ kN}$ i $1,85 \text{ kN}$. Natomiast zatarcie próbek na rysunkach 12-16 nastąpiło po osiągnięciu maksymalnej wartości siły normalnej, która wynosiła $P_n \sim 2,15 \text{ kN}$. Tak więc obciążenie zatarcia było większe o około 34% do 56% od obciążenia zatarcia dla próbek stalowych. Maksymalna temperatura próbki wynosiła od $53,6^\circ\text{C}$ do $68,6^\circ\text{C}$. Zużycie ściernie próbek było nieznaczne. Czas współpracy do chwili zatarcia był znacznie dłuższy niż dla próbek stalowych.



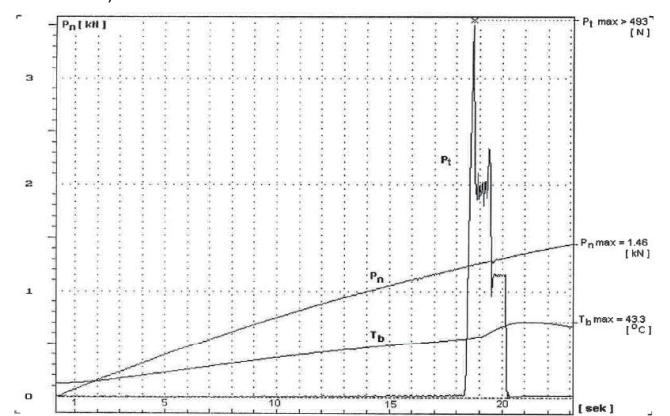
Rys. 3. Przebieg wykresów charakteryzujących zatarcie pary ciernej stał ŁH15 / stal 50 HSA



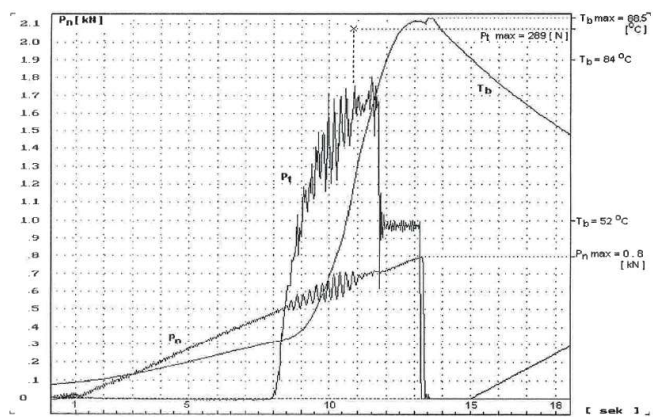
Rys. 6. Przebieg wykresów charakteryzujących zatarcie pary ciernej stał ŁH15 / stal 50 HSA



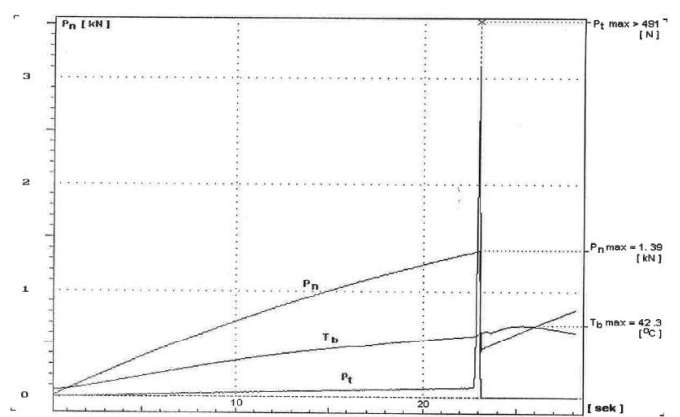
Rys. 4. Przebieg wykresów charakteryzujących zatarcie pary ciernej stał ŁH15 / stal 50 HSA



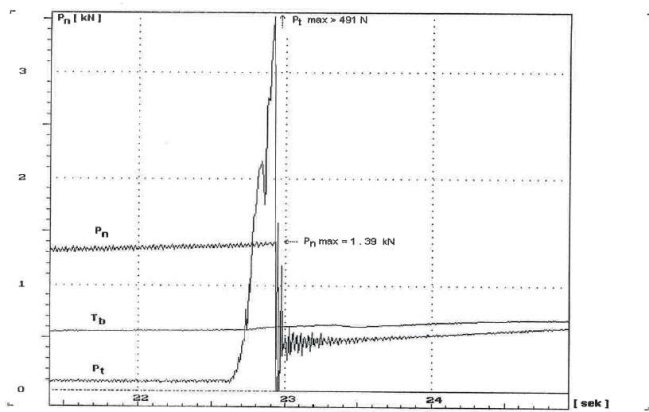
Rys. 7. Przebieg wykresów charakteryzujących zatarcie pary ciernej stał ŁH15 / stal 50 HSA



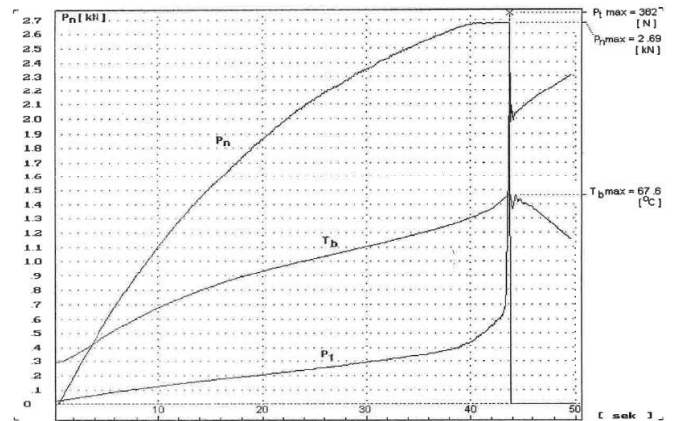
Rys. 5. Przebieg wykresów charakteryzujących zatarcie pary ciernej stał ŁH15 / stal 50 HSA



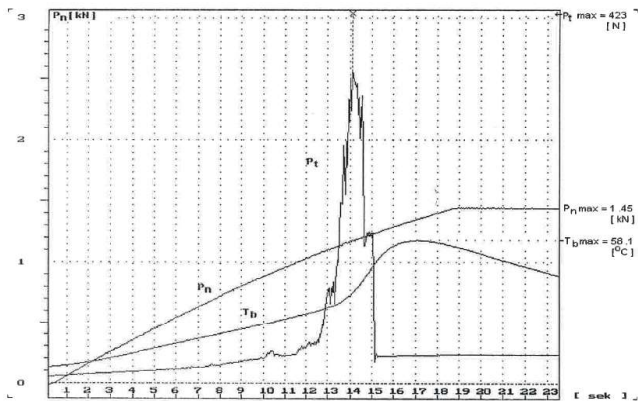
Rys. 8. Przebieg wykresów charakteryzujących zatarcie pary ciernej stał ŁH15 / stal 50 HSA



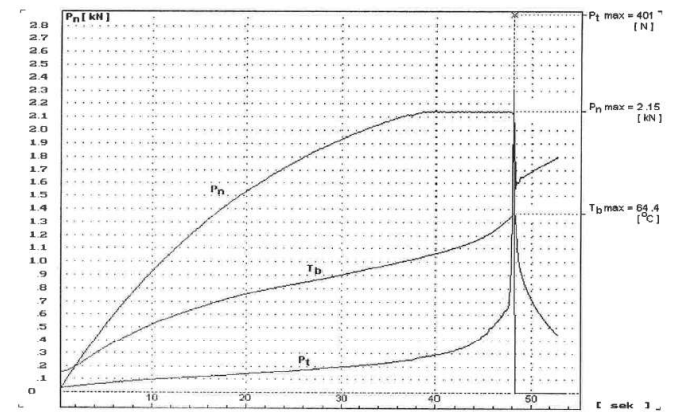
Rys. 9. Przebieg wykresów charakteryzujących zatarcie pary czarnej stał 41H15 / stal 50 HSA / fragment przebiegu z rysunku 8 samego momentu zatarcia bez uśredniania wyników pomiaru.



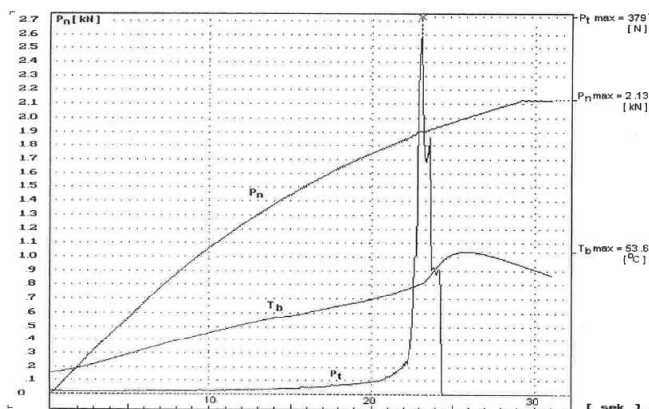
Rys. 12. Przebieg wykresów charakteryzujących zatarcie pary czarnej stał 41H15 / węgiel wolframu WC



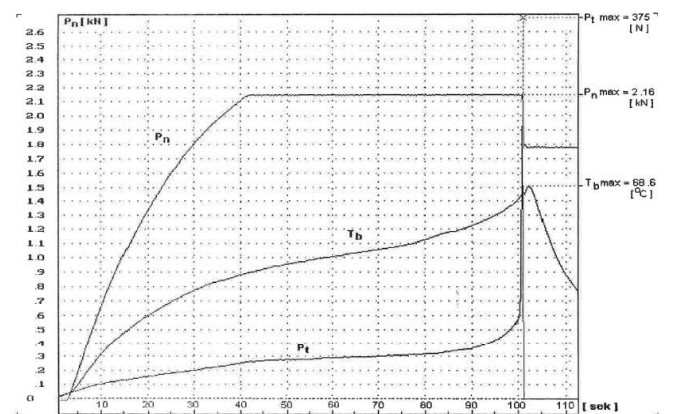
Rys. 10. Przebieg wykresów charakteryzujących zatarcie pary czarnej stał 41H15 / węgiel wolframu WC



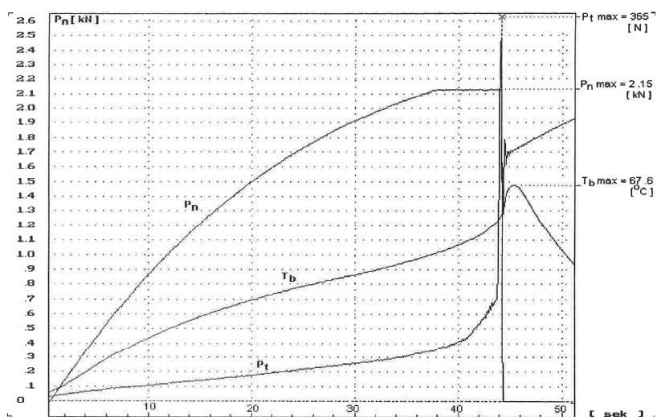
Rys. 13. Przebieg wykresów charakteryzujących zatarcie pary czarnej stał 41H15 / węgiel wolframu WC



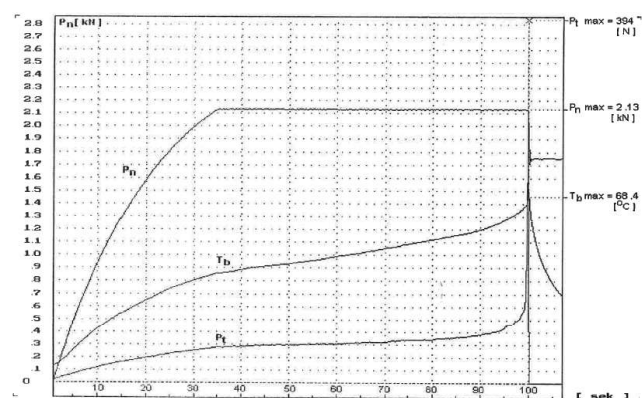
Rys. 11. Przebieg wykresów charakteryzujących zatarcie pary czarnej stał 41H15 / węgiel wolframu WC



Rys. 14. Przebieg wykresów charakteryzujących zatarcie pary czarnej stał 41H15 / węgiel wolframu WC

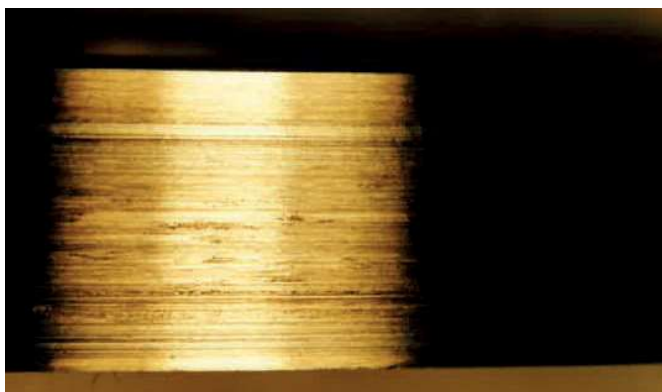


Rys. 15. Przebieg wykresów charakteryzujących zatarcie pary ciernej stal ŁH15 / węgiel wolframu WC

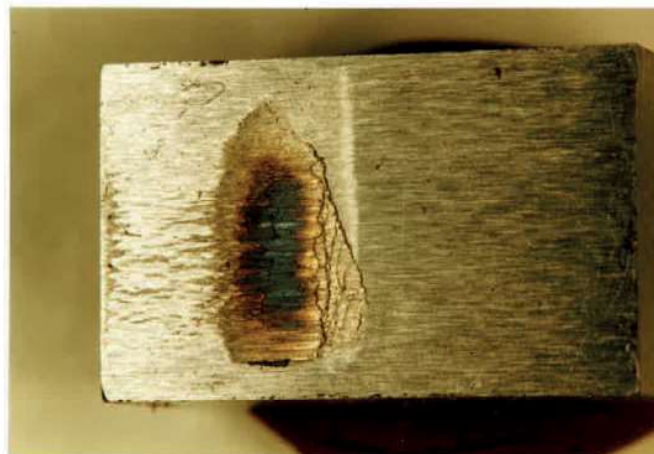


Rys. 16. Przebieg wykresów charakteryzujących zatarcie pary ciernej stal ŁH15 / węgiel wolframu WC

Przy wartościach siły normalnej $P_n=1,5-2$ kN następował gwałtowny wzrost sił stycznych i dalszy wzrost temperatury próbek. Maksymalna temperatura próbek wynosiła od $81,7^{\circ}\text{C}$ do 111°C . Powierzchnie próbek nie wykazywały istotnego zużycia tciernego. Przebieg zatarcia par ciernych: wałec ze stali 1.1115 i próbki powlekanej warstwą WC przedstawiają rysunki 10-16. Pierwsze objawy zatarcia pojawiały się przy kN po czym para nadał współpracowała przy nasilających się zjawiskach dynamicznych. Wyraźne objawy zatarcia wystąpiły Przy maksymalnej temperatura próbek, która wynosiła od 45°C do $70,5^{\circ}\text{C}$. Zużycie ściernie próbek było nieznaczne.



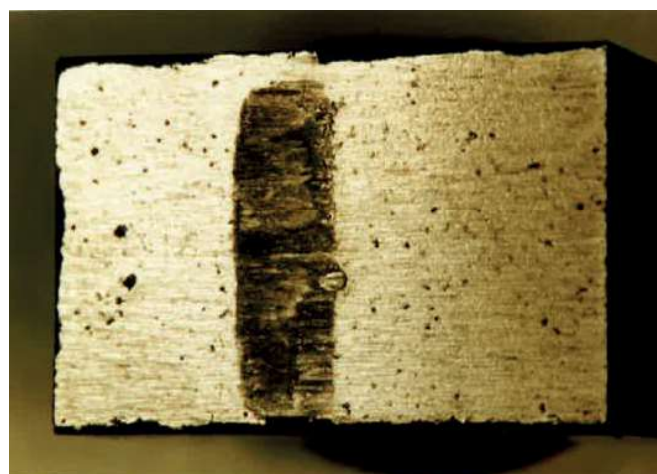
Rys. 17. Stal ŁH15 - rysunek przedstawia obraz zatartego pierścienia stalowego (ŁH15). Widoczne są wzdłużne (obwodowe) rysy powstałe na skutek współpracy z próbką oraz miejscowo naniesiony materiał próbki.



Rys. 18. Stal 50 HSA - Na obrazie pola kontaktu próbki stalowej (50HSA) widać wyraźnie zabarwienia świadczące o występowaniu bardzo wysokiej temperatury oraz ślady zużycia i ubytki materiału u próbki



Rys. 19. Stal 50 HSA - przedstawia obraz zatartej próbki stalowej, z tą różnicą, że widoczne jest wyraźnie pole, w którym nastąpiło miejscowe nadtopienie materiału próbki. Fakt ten świadczy o bardzo wysokiej temperaturze w strefie kontaktu. Na obu próbkach widoczny jest obszar znacznego zużycia ściernego.



Rys. 20. WC - Na próbce pokrytej warstwą węgla wolframu (WC) pojawił się obszar odkształcenia plastycznego oraz miejscowe nadtopienie materiału.

Na próbce pokrytej warstwą węgla wolframu WC pojawiło się wzniesienie przed strefą kontaktu o wysokości $4\mu\text{m}$ i długości

1,6 mm oraz drugie wzniesienie poza strefą kontaktu o wysokości 27 μm i długości 2,65 mm. Wzniesienia te świadczą o miejscowym oddzieleniu się naniesionej warstwy od materiału próbki. Prawdopodobnym powodem tego faktu jest znaczny wzrost temperatury oraz występowanie dużych nacisków w strefie kontaktu.

Wzrost temperatury od 20 do 100 °C w strefie kontaktu powoduje 44-krotne zmniejszenie lepkości dynamicznej oleju. Fakt ten powoduje zmniejszenie grubości warstwy oleju.

W czasie badań temperatura w miejscu kontaktu wielokrotnie przewyższała temperaturę próbek T_b , świadczyło o tym intensywne wydzielanie się dymu na skutek palenia się oleju.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

- Proces zatarcia przebiega klasycznie dla par ciernych stal-stal. Podobnie przebiega ten proces dla par stal-węgiel wolframu, jednakże obciążenie zatarcia jest większe niż dla par stal-stal.
- Mierzona temperatura próbek w odległości około 4 mm od strefy kontaktu nie jest miarodajna do określenia temperatury w miejscu styku. Temperatura powierzchni jest znacznie wyższa – co pokazały utlenione powierzchnie próbek.
- Stwierdzono zdecydowanie mniejsze zużycie warstw ceramicznych niż próbek stalowych.

Literatura

1. Wolff R.: Wpływ chropowatości powierzchni na zjawisko zatarcia. Rozprawa doktorska – Politechnika Warszawska 1980.
2. Dietrich M.: Podstawy Konstrukcji Maszyn, PWN 1989.
3. Brodowicz K., Kwaśniak E., Mikoś M., Pasierski J., Stupnicki J.: Badanie warunków zatarcia Par ciernych dla wybranych powłok ceramicznych. Materiały konferencji „Problemy badawcze energetyki Ciepłej 1993”.
4. Brodowicz K., Kwaśniak E., Ghoneam S.M., Mikoś M., Osiński G., Pasierski J., Stupnicki J., „Influence of ceramic coatings on a start and progres of scuffing phenomenta”
5. Asanabe S.: Applications of ceramics for tribological components, Tribology International, Volume 20, Issue 6, 1987, Pages 355-364,
6. Barbezat G., Nicol A.R., Sickinger A.: Abrasion, erosion and scuffing resistance of carbide and oxide ceramic thermal sprayed coatings for different applications, Wear, Volumes 162–164, Part A, 1993, Pages 529-537,
7. Lorenzo-Martin C., Ajayi O.O., Routbort Singh J.L.: Evaluation of scuffing behavior of single-crystal zirconia ceramic materials, Wear Volume 263, Issues 7–12, 10 September 2007, Pages 872-877
8. Ludema K.C.: Lubricated Sliding-A Review of Chemical and Physical Effects, Editor(s): D. Dowson, C.M. Taylor, T.H.C. Childs, G. Dalmaz, Tribology Series, Elsevier, Volume 30, 1995, Pages 383-398,
9. Młynarczak, A. Przypadek zatarcia łożysk pochwy wału śrubowego, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej 2014 | R. 55 nr 4 (199) | 51–63
10. Tanase T., Mayama O., Matsunaga H.: Properties of sintered wear-resistant alloys having high volume fraction of carbides, Metal Powder Report, Volume 45, Issue 3, 1990, Pages 198-201,
11. Zammit A. and Stephen Abela and John Charles Betts and

Remigijusz Michalczewski and Marek Kalbarczyk and Maurice Grech.: Scuffing and rolling contact fatigue resistance of discrete laser spot hardened austempered ductile iron, Wear 422-423, 2019, 100-107.

12. Żórawski W.: Scuffing resistance of plasma-sprayed ceramic coatings, Advances in Manufacturing Science and Technology 2001 | Vol. 25, nr 3 | 137-146
13. Żórawski, W.: Odporność na zatarcie galwanicznych powłok chromowych i natryskanych HVOF powłok WC12Co, Tribologia 2008 | nr 4 | 235-245
14. Żórawski, W. , Ozimina, D.: Odporność na zatarcie powłok kompozytowych natryskiwanych plazmowo i naddźwiękowo, Tribologia 2005 | nr 4 | 323-334
15. Żórawski, W. , Trpcevska, J.: Odporność na zacieranie powłok węglkowych natryskanych naddźwiękowo, Tribologia 2007 | nr 3-4 | 453-463



dr hab. inż. Artur Rusowicz prof. uczelni jest prodziekanem ds. ogólnych na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Jego działalność naukowa związana jest z szeroko pojętą aparaturą przemysłową wykorzystywaną w urządzeniach i instalacjach energetyki przemysłowej.