

WYBRANE CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA ODPORNOŚĆ NA ŻUŻYCIE WĘZŁÓW ŚLIZGOWYCH

W artykule omówiono wpływ wybranych czynników charakteryzujących elementy węzłów ślizgowych oraz wybranych warunków eksploatacji na odporność na zużycie smarowanych węzłów tarcia. Przedstawiono wyniki badań tribologicznych realizowanych przy zróżnicowanej chropowatości powierzchni stalowej tarczy, wyrażonej parametrem Ra w zakresie 0,05-0,24 µm. Badaniom poddano również węzły cierne o zróżnicowanej twardości stalowego elementu w zakresie 22-42HRC. Badania odporności zrealizowano w odniesieniu do dwóch różnych skojarzeń materiałowych: stal-stal (42CrMo4 - 100Cr6) oraz stal-ceramika (42CrMo4 - SiC) w celu oceny możliwości zastosowania ceramiki w węzłach ciernych. W wyniku zrealizowanych badań przy różnych obciążeniach wykazano, że chropowatość powierzchni, twardość i rodzaj materiału, a także warunki eksploatacji wywierają istotny wpływ na odporność na zużycie współpracujących ślizgowo części maszyn.

WSTĘP

Trwałość i niezawodność maszyn w około 80% określana jest przez uszkodzenia ich węzłów kinematycznych [1]. Zużycie części maszyn powoduje określone straty ekonomiczne dla gospodarki, z czego największe spowodowane są przez zużycie ściernie. Nie mniej jednak ważne są inne rodzaje zużycia, takie jak adhezyjne, zmęczeniowe czy tribochemiczne, które w określonych warunkach mogą być dominującym rodzajem zużycia i w sposób szczególnie ograniczać trwałość maszyn. Pojazdy samochodowe ze względu na środowisko i warunki użytkowania narażone są w zasadzie na wszystkie rodzaje zużycia. Węzły kinematyczne pojazdów samochodowych powinny być odporne na obciążenia dynamiczne, drgania, wysokie i niskie temperatury, korozję i inne czynniki specyficzne dla pewnych zastosowań. Kształtowanie odpowiednich właściwości użytkowych węzłów kinematycznych wiąże się z doбором właściwych materiałów oraz metod obróbki elementów maszyn, a w szczególności ich warstw wierzchnich.

Przeciwdziałanie zużyciu ściernemu zwykle realizuje się poprzez ukształtowanie twardej warstwy wierzchniej, obróbkę powierzchniową czy zapewnienie zdolności wchłaniania ziarn ściernych przez jeden z elementów węzła ciernego. Najprostszym sposobem ograniczenia zużycia adhezyjnego jest stosowanie węzłów kinematycznych w skojarzeniu materiałowym różnoimiennym. Niestety skojarzenia jednoimiennie typu: stal-stal, stal-żeliwo, żeliwo-żeliwo dosyć często występują w budowie maszyn. W takim przypadku należy kształtować mikrogeometrię powierzchni, która zapewni przerywanie styku tarcioowego lub strefę przypowierzchniową o dodatnim gradiencie na ścinanie. Pojazdy samochodowe powinny być szczególnie zabezpieczone przed korozją ze względu na zmienne warunki środowiskowe, w których są użytkowane. Zastosowanie stali odpornych na korozję pozwala na ograniczenie zużycia lecz nie zapewni trwałego zmniejszenia zużycia węzłów ślizgowych narażonych na działanie środowiska korozyjnego. Zużycie mechaniczne w węzle ślizgowym, narażonym na działanie środowiska korozyjnego, determinowane jest mikroskrawaniem lub usuwaniem warstwy pasywnych tlenków [2]. Coraz większym zastosowaniem do produkcji elementów maszyn pracujących w trudnych warunkach eksploatacyjnych, szczególnie w środowisku korozyj-

nym, cieszą się materiały ceramiczne [3, 4]. Zastosowanie elementu ceramicznego (SiC) w węzle ciernym pozwoliło na obniżenie współczynnika tarcia o 17% w porównaniu do wartości współczynnika tarcia w węzle ślizgowym w skojarzeniu materiałowym stal-stal [5].

Nierówności powierzchni ślizgowych wywierają istotny wpływ na opory ruchu i wielkość zużycia części maszyn. Zastosowanie dodatkowej obróbki wykończeniowej powierzchni pozwoliło na zmniejszenie wartości współczynnika tarcia o 6 - 12%, dodatkowo na tych powierzchniach nie obserwowano żadnych śladów zużycia po próbach tarcia [6]. W pracy [6] wykazano, że twardość materiału przy niewielkim obciążeniu węzła tarcia ($Q = 5 \text{ N}$) wywiera istotny, ale niewielki wpływ na wielkość oporów ruchu.

Zużycie powierzchni węzłów ślizgowych, w których styk współpracujących powierzchni jest rozłożony, można ograniczyć poprzez ukształtowanie wgłębień w powierzchni, pełniących rolę kieszeni smarowych oraz umożliwiających przerywanie styku tarcioowego [7, 8]. W węzłach ślizgowych o niewielkiej powierzchni styku lub w przypadku styku skoncentrowanego do budowy elementów węzła ślizgowego celowym jest stosowanie materiałów o wysokiej odporności na różne rodzaje zużycia.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań tribologicznych z zastosowaniem elementu ceramicznego w węzle ślizgowym. Badania realizowano przy zróżnicowanych obciążeniach oraz z zastosowaniem tarcz o różnej twardości i chropowatości powierzchni.

1. METODYKA BADAŃ

1.1. Charakterystyka wybranych właściwości materiałów zastosowanych na elementy ślizgowe

Badaniom poddano stalowe próbki wykonane ze stali 42CrMo4 o zróżnicowanej twardości materiału: 22HRC – bez obróbki cieplnej oraz dwa warianty po ulepszeniu cieplnym do twardości 32HRC oraz 42HRC. Powierzchnie stalowych próbek poddano obróbce wykończeniowej w celu uzyskania chropowatości charakteryzującej się różną wysokością nierówności powierzchni. Podstawową obróbką wykończeniową zastosowaną na każdej badanej powierzchni było szlifowanie. Część próbek poddano dodatkowo polerowaniu, a kolejną partię docieraniu. Wartość średnia parametru Ra dla powierzchni szlifowanych wynosiła 0,245 µm. Średnie arytmetyczne

odchylenie rzędnych profilu od linii średniej (R_a) powierzchni po dodatkowej obróbce polerowaniem wynosiło średnio $0,098 \mu\text{m}$. Powierzchnie próbek po zastosowaniu docierania charakteryzowały się R_a równym średnio $0,0488 \mu\text{m}$.

Przeciwności stanowiły kulki o średnicy $6,35 \text{ mm}$ wykonane ze stali 100Cr6 oraz kulki ceramiczne z węgla krzemowego (SiC). Chropowatość powierzchni kulek wynosiła około $0,03 \mu\text{m}$ (R_a).

Wartości wybranych własności materiału zastosowanego na ceramiczne kulki zamieszczono w tab. 1.

Tab. 1. Wybrane własności ceramiki SiC

Własności	Jednostka	Wartość
Twardość	HV	2800 (30 GPa)
Gęstość	g/cm^3	3,12
Moduł Younga	GPa	450
Odporność na pęknięcia kruche	$\text{MPa m}^{-1/2}$	4
Maksymalna temperatura pracy	$^\circ\text{C}$	1400
Wsp. rozszerzalności cieplnej	$\times 10^{-6}/\text{K}$	3,00

Do pomiaru i analizy chropowatości powierzchni zastosowano profilometr stykowy Surtronic 25 oraz oprogramowanie TalyProfile Lite 6.

1.2. Badania tribologiczne węzłów ślizgowych

Badania tribologiczne zrealizowano z wykorzystaniem testera z węzłem ciernym typu kulka-tarcza w styku skoncentrowanym. Tarcze o średnicy $25,4 \text{ mm}$ wykonywały ruch obrotowy, natomiast kulki dociskano z określoną siłą do powierzchni próbek. Węzły cierne smarowano olejem maszynowym L-AN 46. W tab. 2 przedstawiono wybrane właściwości oleju L-AN 46.

Tab. 2. Wybrane właściwości oleju L-AN 46

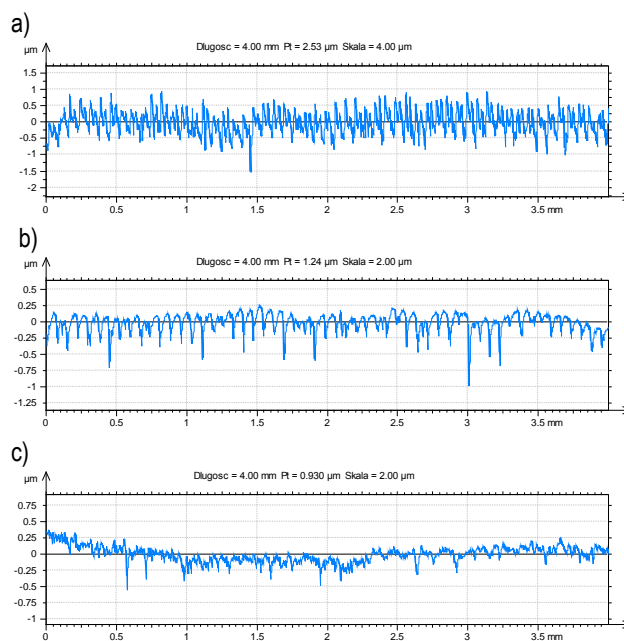
Parametry fizyko-chemiczne	Jednostka	Wartość
Lepkość kinematyczna w temp. 40°C	mm^2/s	46
Lepkość kinematyczna w temp. 100°C	mm^2/s	6,66
Wskaźnik lepkości	-	96
Temperatura płynięcia	$^\circ\text{C}$	-12
Temperatura zapłonu	$^\circ\text{C}$	235
Gęstość w 15°C	kg/m^3	880

Na powierzchni ślizgowej rozprowadzono jedną kroplę oleju. Temperatura otoczenia podczas badań wynosiła około $21\text{-}22^\circ\text{C}$. Prędkość poślizgu wynosiła $0,08 \text{ m/s}$. Próby tarcia prowadzono przy sile docisku Q równej 10 N i 20 N . Do pomiaru oporów ruchu zastosowano czujnik tensometryczny siły o zakresie 50 N i dokładności $\pm 0,05 \text{ N}$. Powierzchnie stalowych tarcz po próbach tarcia poddano obserwacji z wykorzystaniem mikroskopu optycznego.

2. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Na rys. 1 przedstawiono profile powierzchni po szlifowaniu oraz po zastosowaniu dodatkowych obróbek wykończeniowych, tj. polerowania i docierania.

Po zastosowaniu dodatkowej obróbki polerowaniem dwukrotnie zmniejszyła się wysokość profilu pierwotnego, przede wszystkim poprzez zmniejszenie wysokości wzniesień. W wyniku zastosowania obróbki docieraniem po szlifowaniu powierzchni otrzymano ponad dwukrotne zmniejszenie wysokości profilu powierzchni. Z tym, że w tym przypadku uzyskano zarówno mniejszą wysokość wzniesień, jak również wgłębien profilu.



Rys. 1. Wybrane profile powierzchni stalowych próbek po obróbce wykończeniowej: szlifowaniem (a), szlifowaniem i polerowaniem (b) oraz szlifowaniem i docieraniem (c)

W tab. 3 przedstawiono średnie wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni.

Tab. 3. Średnie wartości parametrów chropowatości powierzchni uzyskane po poszczególnych obróbkach wykończeniowych

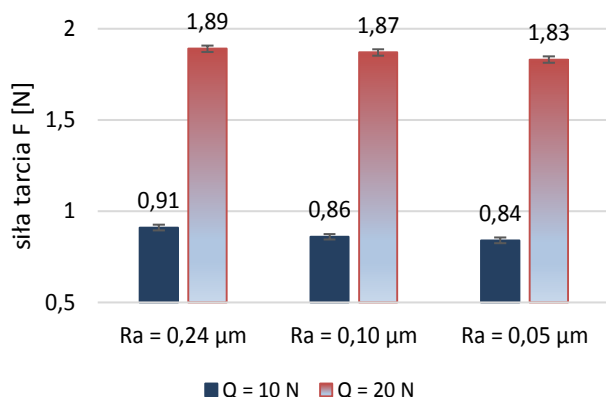
Parametr	Chropowatość powierzchni		
	po szlifowaniu	po szlifowaniu i polerowaniu	po szlifowaniu i docieraniu
R_p [μm]	0,846	0,181	0,158
R_v [μm]	0,994	0,669	0,385
R_z [μm]	1,84	0,850	0,542
R_a [μm]	0,245	0,098	0,0488
R_q [μm]	0,309	0,134	0,0699
R_{sk}	-0,0432	-1,75	-1,49
R_{ku}	2,96	7,86	7,59

Powierzchnia po szlifowaniu charakteryzowała się średnim odchyleniem rzędnych profilu (R_a) wynoszącym średnio $0,245 \mu\text{m}$ z niewielką asymetrią profilu (R_{sk}) równą $-0,0432$. Maksymalne wgłębienie powierzchni (R_v) szlifowanych wynosiły prawie $1 \mu\text{m}$, natomiast wniesienia powierzchni (R_p) miały niespełna $0,9 \mu\text{m}$. Współczynnik skupienia wartości wokół średniej (R_{ku}) wynosił prawie 3.

Po zastosowaniu polerowania oraz docierania wartości większości amplitudowych parametrów chropowatości uległy zmniejszeniu. Wysokość wzniesień profilu zmniejszono o około 80%, natomiast głębokość dolin zmniejszyła się o ponad 30% w wyniku polerowania, ale o ponad 60% po procesie docierania. Większą asymetrią profilu chropowatości charakteryzowała się powierzchnie po zastosowaniu polerowania, gdzie wartość skośności wynosiła średnio $-1,75$. Kurtოza po polerowaniu oraz docieraniu wzrosła powyżej wartości 7. Średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej było około 2,5-rza mniejsze po polerowaniu w porównaniu do powierzchni szlifowanych, a po docieraniu 5-krotnie mniejsze niż R_a powierzchni szlifowanych.

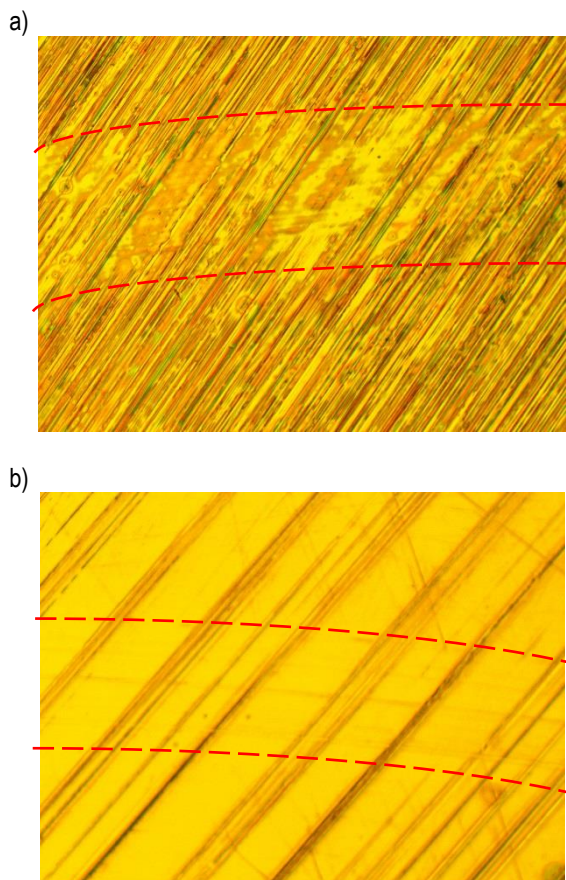
W rezultacie prowadzonych badań tribologicznych określono wartości siły tarcia w skojarzeniu materiałowym stal – ceramika przy zróżnicowanej chropowatości powierzchni stalowych tarcz i przy różnych obciążeniach węzła ciernego (rys. 2). Powierzchnie o mniejszej wysokości chropowatości charakteryzowały mniejsze

opory ruchu. Zmniejszenie siły tarcia w wyniku zastosowania dodatkowej obróbki technologicznej było jednak nieznaczne, przy obciążeniu siłą 10 N opory ruchu zmniejszyły się o 5 – 8%, natomiast przy obciążeniu równym 20 N siła tarcia była mniejsza jedynie o 1 – 3% w porównaniu do siły tarcia w węzłach z tarczą po szlifowaniu.



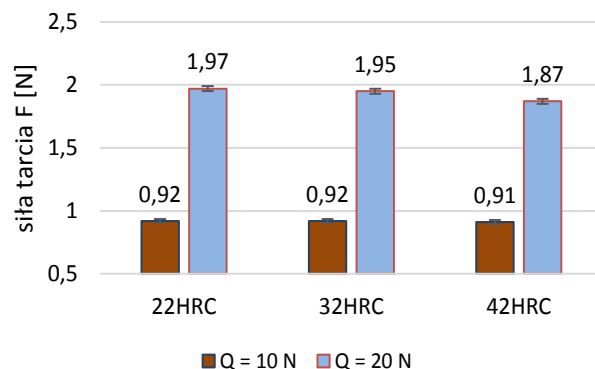
Rys. 2. Siła tarcia w węzłach ślizgowych w skojarzeniu materiałowym stal 42CrMo4 - ceramika SiC o zróżnicowanej chropowatości powierzchni stalowej tarczy (twardość 42HRC)

Pomimo to, na powierzchniach szlifowanych po próbach tarcia obserwowano znaczne odkształcenia plastyczne nierówności powierzchni, natomiast po zastosowaniu dodatkowej obróbki polerowaniem na powierzchni ślizgowej po próbach tarcia pojawiły się jedynie mało wyraźne ślady zużycia i dopiero przy zastosowaniu większej siły docisku Q równej 20 N (rys. 3).



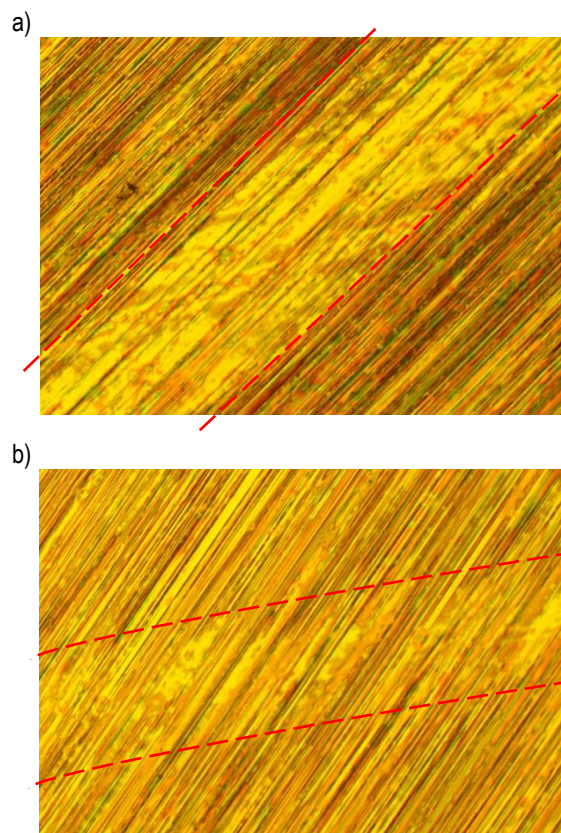
Rys. 3. Zdjęcia powierzchni po próbach tarcia w skojarzeniu materiałowym stal 42CrMo4 - ceramika SiC o zróżnicowanej chropowatości powierzchni stalowej tarczy (twardość 42HRC, Q = 20 N): $Ra = 0,24 \mu\text{m}$ (a) i $Ra = 0,1 \mu\text{m}$ (b); pow. 200x

Analizie poddano również wpływ twardości materiału stalowych elementów ślizgowych na opory ruchu i ich zużycie. Na rys. 4 przedstawiono średnie wartości siły tarcia uzyskane przy zróżnicowanych obciążeniach.



Rys. 4. Siła tarcia w węzłach ślizgowych w skojarzeniu materiałowym stal 42CrMo4 - ceramika SiC o zróżnicowanej twardości stalowej tarczy ($Ra = 0,24 \mu\text{m}$)

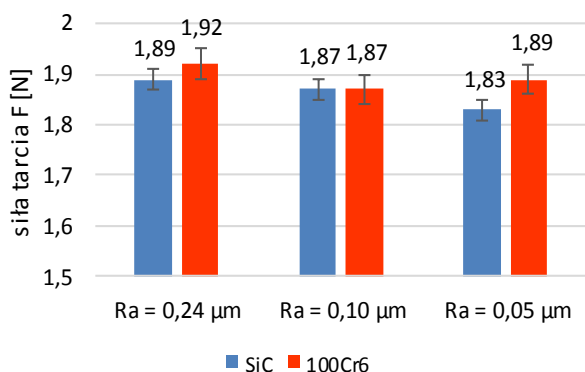
Przy większym obciążeniu równym 20 N wraz ze wzrostem twardości materiału maleją opory ruchu, natomiast przy mniejszym obciążeniu wynoszącym 10 N spadek wartości siły tarcia występuje jedynie w badaniach z zastosowaniem stalowej tarczy o twardości 42HRC. Choć zmniejszenie wartości siły tarcia po zastosowaniu obróbki cieplnej i uzyskaniu twardości 42HRC wyniosło tylko 1% w porównaniu do siły tarcia przy zastosowaniu stali o twardości 22HRC, to zużycie powierzchni po próbach różniło się zasadniczo (rys. 5).



Rys. 5. Zdjęcia powierzchni po próbach tarcia w skojarzeniu materiałowym stal 42CrMo4 - ceramika SiC o zróżnicowanej twardości materiału stalowej tarczy ($Ra = 0,24 \mu\text{m}$, Q = 10 N): twardość 22HRC (a) i twardość 42HRC (b); pow. 200x

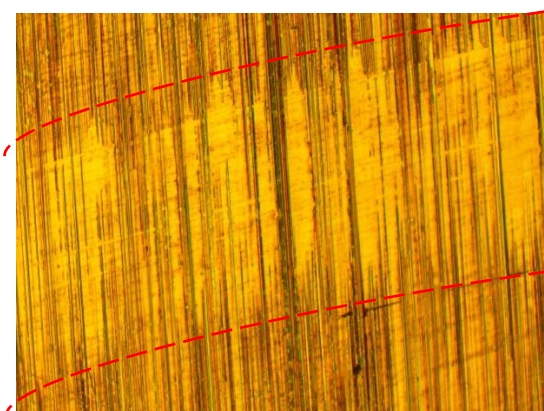
Nierówności powierzchni materiału o twardości 22HRC w miejscach kontaktu z elementem kulistym uległy rozległym odkształceniom, niezmiennione pozostały wyłącznie najgłębsze rysy po szlifowaniu. Przy porównywalnych wartościach siły tarcia, tj. około 0,91 N, otrzymano zupełnie odmienny obraz powierzchni po próbach tarcia materiału o twardości 42HRC. Obserwowano niewielkie odkształcenia w miejscach kontaktu z kulką. Zużyciu uległy tylko niektóre najwyższe wzniesienia powierzchni.

W celu porównania odporności na zużycie węzłów ślizgowych w skojarzeniu materiałowym jedno- i różnoimiennym przeprowadzono również próby tarcia z zastosowaniem kulek łożyskowych ze stali 100Cr6. Badania zrealizowano przy zróżnicowanej chropowatości powierzchni stalowej tarczy i stałej twardości materiału równej 42HRC (rys. 6).



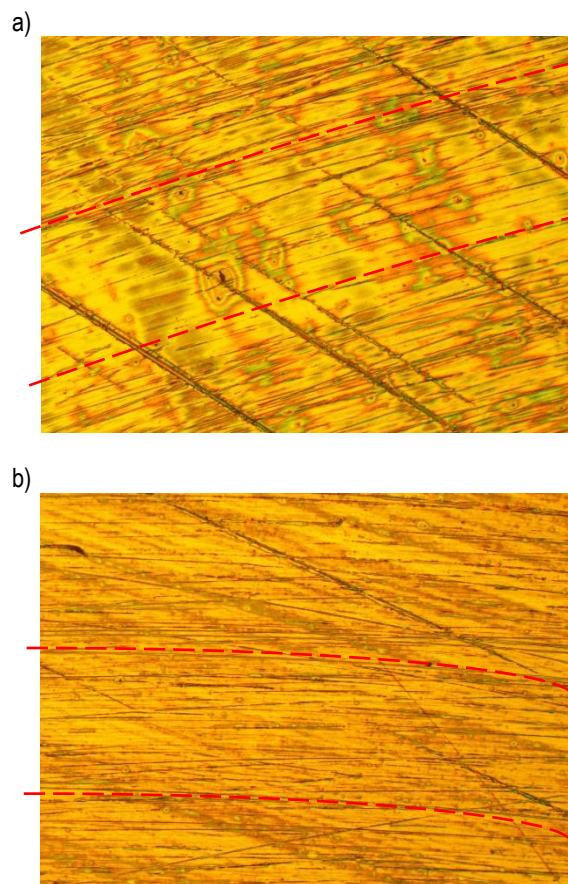
Rys. 6. Siła tarcia w węzłach ślizgowych w skojarzeniu materiałowym stal 42CrMo4 - ceramika SiC oraz stal 42CrMo4 - stal 100Cr6 o zróżnicowanej chropowatości powierzchni stalowej tarczy (twardość 42HRC), $Q = 20\text{ N}$

W większości przypadków większe opory ruchu występowały, gdy stosowano jednoimienne węzły ślizgowe typu stal-stal. Różnice między wartościami siły tarcia były jednak nieznaczne, dochodzące do kilku procent w przypadku węzła ciernego o najmniejszej chropowatości powierzchni stalowej tarczy ($R_a = 0,05\text{ }\mu\text{m}$). Obserwacje mikroskopowe wskazały, że powierzchnia szlifowana ($R_a = 0,24\text{ }\mu\text{m}$) poddana procesowi tarcia w skojarzeniu ze stalowym elementem kulistym charakteryzuje się rozległymi odkształceniami nierówności (rys. 7), zużycie tej powierzchni jest większe w porównaniu z powierzchnią współpracującą z elementem ceramicznym (rys. 3a).



Rys. 7. Zdjęcie powierzchni po próbach tarcia w skojarzeniu materiałowym stal 42CrMo4 - stal 100Cr6; twardość materiału stalowej tarczy 42HRC, $R_a = 0,24\text{ }\mu\text{m}$, $Q = 20\text{ N}$; pow. 200x

Na powierzchniach stalowych tarcz o najmniejszej chropowatości ($R_a = 0,05\text{ }\mu\text{m}$), zarówno po zastosowaniu ceramiki, jak i elementu stalowego w próbach tarcia, nie obserwowano żadnych widocznych śladów zużycia (rys. 8).



Rys. 8. Zdjęcia powierzchni po próbach tarcia w skojarzeniu materiałowym stal 42CrMo4 - ceramika SiC (a) oraz stal 42CrMo4 - stal 100Cr6 (b); twardość materiału stalowej tarczy 42HRC, $R_a = 0,05\text{ }\mu\text{m}$, $Q = 20\text{ N}$; pow. 200x

Jak wynika z przeprowadzonych badań wiele czynników wpływa na zużycie i opory ruchu węzłów ślizgowych. Istotne znaczenie mają zarówno twardość materiału elementu ślizgowego, chropowatość jego powierzchni, jak również rodzaj zastosowanego materiału na węzły cierne. Im twardsze materiały, tym mniejsze opory ruchu w zastosowanych warunkach tarcia. Mniejsza wysokość nierówności powierzchni wpłynęła na uzyskanie mniejszej siły tarcia oraz ograniczenie zużycia powierzchni ślizgowej. Zastosowanie ceramicznego elementu z węgla krzemu w węzle ślizgowym spowodowało zmniejszenie wielkości siły tarcia i zużycia w porównaniu do węzłów w skojarzeniu stal-stal.

Analizując otrzymane wyniki należy stwierdzić, że ocena odporności na zużycie powinna być dokonywana w oparciu o kompleksowe badania, uwzględniające szereg czynników mogących wpływać na zużycie, ale także z zastosowaniem kilku niezależnych metod badawczych, pozwalających określić skutki tarcia. Niewielka różnica w wartości siły tarcia, mieszcząca się w granicy błędów statystycznego, uzyskana w badaniach niektórych wariantów węzłów ślizgowych nie koreluje ze znaczną różnicą wielkości zużycia porównywanych powierzchni ślizgowych, stwierdzoną na podstawie obserwacji mikroskopowych.

PODSUMOWANIE

W wyniku zrealizowanych badań potwierdzono możliwość stosowania ceramiki (węglika krzemu) do budowy części maszyn pracujących w warunkach tarcia. Stosowanie materiałów ceramicznych w pojazdach samochodowych stanowi alternatywę do wykorzystywania materiałów stalowych, które charakteryzują się niewystarczającą odpornością na korozję.

Wykazano, że twardość materiału, chropowatość powierzchni i rodzaj materiału elementów ślizgowych, a także warunki pracy parciernych są istotne z punktu widzenia minimalizacji oporów ruchu i wielkości zużycia węzłów kinematycznych części maszyn.

BIBLIOGRAFIA

1. Legutko S., Nosal S., *Kształtowanie technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej części maszyn*, OWN PAN, Poznań 2004.
2. Stachowiak A., *Identyfikacja mechanizmów zużycia korozyjno-mechanicznego stali odpornych na korozję w węzłach ślizgowych*, „Problemy eksploatacji” 1, 2010.
3. Dobrzański L., *Niemetalowe materiały inżynierskie*, WPS, Gliwice 2008.
4. www.ceromit.pl dostęp w dniu 15.05.2015.
5. Bulikowska B., Gałda L., *Rozdz. Analiza wpływu wybranych właściwości warstwy wierzchniej na charakterystyki tribologiczne węzła ślizgowego 42CrMo4-SiC*, Monografia (red. L. Gałda) *Metody statystyczne w praktyce inżynierskiej*, OWPRz, Rzeszów 2015.
6. Bulikowska B., Gałda L., *Wpływ nierówności powierzchni na właściwości tribologiczne elementów ślizgowych w skojarzeniu materiałowym SiC - 42CrMo4*, „Tribologia” 2015, 4 (262).
7. Gałda L., *Wpływ mikrokieszeni smarowych wygniatających udarowo na właściwości tribologiczne elementów ślizgowych*, rozprawa doktorska, Rzeszów 2008.
8. Gałda L., Dzierwa A., Sep J., Pawlus P., *The effect of oil pockets shape and distribution on seizure resistance in lubricated sliding*, “Tribology Letters” 37, 2010.

Selected factors effecting on wear resistance of sliding pairs

The effect of selected factors characterizing the elements of sliding pairs and the influence of selected exploitation conditions on wear resistance are described in the article. The results of tribological tests realized at different surface roughness of steel discs, Ra in the range of 0,05 – 0,24 μm, are presented. The influence of material hardness of the steel discs in the range of 22-42HRC was also tested. The experiments were realized with the usage of two material sets: steel-steel (42CrMo4 - 100Cr6) and steel-ceramic (42CrMo4 - SiC) to assess the possibility of ceramic application on the sliding assemblies construction. As the result of the experiments it was demonstrated that the surface roughness, material hardness, material type and also the exploitation conditions influenced significantly on the wear of sliding elements of machines.

Autorzy:

Dr inż. **Lidia Gałda** – Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, lqkmiop@prz.edu.pl