

Andrzej DZIERWA

WPŁYW NAGNIATANIA ŚLIZGOWEGO CERAMIKĄ Al_2O_3 NA WIELKOŚĆ ŻUŻYCIA ELEMENTÓW STALOWYCH

W artykule zaprezentowano wyniki badań wpływu procesu nagniatania ślizgowego ceramiką Al_2O_3 na wielkość zużycia oraz siłę tarcia elementów stalowych. Badania tribologiczne zostały przeprowadzone przy użyciu testera kulka-tarcza. Materiał tarczy stanowiły próbki wykonane ze stali 42CrMo4 ulepszone cieplnie do twardości 40 ± 2 HRC. Materiał kulki o średnicy 6,35 mm stanowiła stal 100Cr6 o twardości 62 HRC. Obróbką wykańczającą tarcz stalowych było nagniatanie ślizgowe ceramiką Al_2O_3 wykonane z różnymi parametrami wejściowymi procesu. Obciążenie podczas badań tribologicznych wyniosło 10 N. Testy wykonano przy średnicach tarczy $d_1=10$ mm, $d_2=15$ mm oraz $d_3=20$ mm stosując identyczną prędkość obrotową $n=300$ obr/min. Prędkość ślizgowa v wyniosła odpowiednio $v_1=0,16$ m/s, $v_2=0,24$ m/s, $v_3=0,32$ m/s. Wielkość zużycia określono przy pomocy profilometru optycznego Talysurf CCI Lite. Po zeskanowaniu powierzchni, generowano profile w kierunku prostopadłym do śladów zużycia, dzięki czemu możliwym było wyznaczenie pola powierzchni zużycia badanych tarcz. W trakcie badań rejestrowano także siłę tarcia. W trakcie testów produkty zużycia znajdujące się komorze testera, a pojawiające się wskutek współpracy elementów były usuwane na bieżąco przy pomocy sprężonego powietrza.

WSTĘP

Zmiany zachodzące w elementach mechanizmów, spowodowane siłami tarcia oraz zjawiskami fizykochemicznymi, występującymi w czasie pracy pojazdu samochodowego, określa się nazwą zużycie. Wskutek zużycia następuje ciągła zmiana wymiarów, ubytek materiału albo deformacja plastyczna niektórych pracujących części w pojeździe samochodowym. Dowolny nowy obiekt techniczny wykonany zgodnie z wymaganiami zawartymi w dokumentacji konstrukcyjnej i technologicznej posiada pełny potencjał eksploatacyjny. W miarę użytkowania i wykonanej przez niego pracy potencjał ten ulega obniżeniu [1]. Następuje to w efekcie zmian fizyko-chemicznych elementów: zużycia par trących, zmęczenia materiału, procesów korozyjnych. Zmiany powodują wzrost luzów, obciążeń dynamicznych i drgań wpływających na obniżenie mocy, zmniejszenie wydajności, podwyższenie zużycia paliwa, oraz podwyższenie uszkodzalności.

Ponieważ zużywanie w większości przypadków prowadzi do zmniejszenia funkcjonalności, trwałości pojazdów, maszyn i ich elementów powinno się mu przeciwdziałać. Ma to na celu wyeliminowanie lub sprowadzenie do minimum skutków zużycia. Przeciwdziałanie powinno zacząć się już na etapie konstruowania, należy wtedy dobrać takie formy zespołu tribomechanicznego, materiały i smarowanie, aby zminimalizować zużycie w trakcie eksploatacji. Oprócz konstrukcyjnego zapobiegania zużyciu istnieje także technologiczny sposób przeciwdziałania jemu, osiągnięty za pomocą [2-4]:

- obróbki cieplnej (hartowanie powierzchniowe),
- obróbki cieplno-chemicznej (np. azotowanie utwardzające, nawęglanie, cyjanowanie, chromowanie dyfuzyjne),
- obróbki plastycznej (np. młotkowanie, dogniatanie),
- pokryć i powłok (np. niklowanie chemiczne, napawanie, fosforowanie).

Jedną z obróbek powierzchniowych mogących opóźnić procesy zużywania jest nagniatanie ślizgowe. Jest bezwiotrowa, wykańczająca obróbka powierzchni metodą zgniotu na zimno [5]. Twardy i

gładki element nagniatający dociskany do powierzchni obrabianej z odpowiednią siłą, wywołuje w strefie nagniatania tarcie ślizgowe i w następstwie tego procesu wygładzenie powierzchni oraz korzystne zmiany właściwości warstwy wierzchniej przedmiotu. Możliwe jest uzyskanie bardzo gładkiej powierzchni [6]. Najczęściej element roboczy do nagniatania ślizgowego dociskany jest do powierzchni przedmiotu obrabianego w sposób sprężysty; docisk narzędzia może być także sztywny, co pozwala na zwiększenie dokładności wymiarowo-kształtowej przedmiotu obrabianego po nagniataniu, ale związane jest też z większymi wymaganiami co do dokładności wymiarowo-kształtowej w obróbce poprzedzającej nagniatanie.

Istotną zaletą nagniatania ślizgowego (wygładzania ślizgowego) jest nie tylko samo wygładzanie powierzchni (zmniejszenie chropowatości), ale również uzyskanie korzystnej z punktu widzenia tribologii struktury geometrycznej powierzchni nagniatanej (SGP). Nagniatanie ślizgowe daje w efekcie nie tylko małą chropowatość powierzchni, ale również duże promienie zaokrągłeń wierzchołków i wrębów nierówności oraz mały kąt ich pochylenia. Wspólnie z wytworzonym zgniotem, wewnętrznymi naprężeniami ściskającymi i zwiększeniem twardości powoduje to zwiększenie odporności na działanie czynników eksploatacyjnych jak: ścieranie, zmęczenie powierzchniowe, korozja [7].

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu procesu nagniatania ślizgowego ceramiką Al_2O_3 na wielkość zużycia oraz siłę tarcia elementów stalowych.

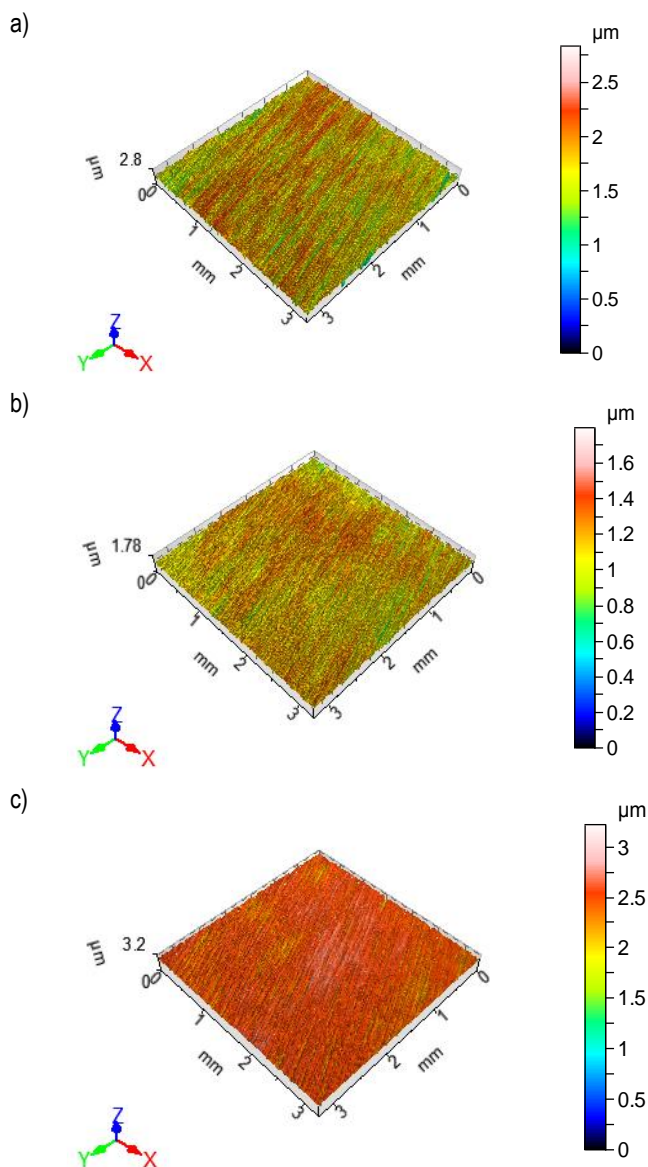
1. METODYKA BADAŃ

Badania tribologiczne przeprowadzono na testerze tribologicznym T-11 (rys. 1) zgodnie ze standardem określonym w normie ASTM G 99. Skojarzenie tribologiczne stanowiła nieruchoma kulka łożyskowa o twardości 62 ± 2 HRC i tarcza obracająca się z zadaną prędkością obrotową równą 300 obr/min. Tarcze wykonane zostały ze stali 42CrMo4 o twardości 40 ± 2 HRC. Obróbką wykańczającą tarcz było nagniatanie ślizgowe przy użyciu ceramiki Al_2O_3 . Obróbkę tą przeprowadzono w 3 wariantach zmieniając siłę docisku narzędzia, dzięki czemu uzyskano różniące się od siebie struktury geo-

metryczne powierzchni. W wariancie pierwszym (W1) siła docisku wyniosła 15 N, w wariancie drugim (W2) – 70 N a w wariancie ostatnim (W3) – 140 N. Parametrami stałymi obróbki były posuw $f=0,05$ mm/obr oraz prędkość obrotowa $n=300$ obr/min. Widoki izometryczne nagniatanych powierzchni przedstawiono na rys. 2. W tabeli 1 zaprezentowano wybrane parametry SGP powierzchni nagniatanych zgodnie z [8]. Dodatkowo w tabeli 1 zaprezentowano parametry SGP powierzchni szlifowanej (SZ) stanowiącej element odniesienia w badaniach tribologicznych.



Rys. 1. Stanowisko tribologiczne – tester T-11 [9]



Rys. 2. Widoki izometryczne próbek nagniatanych ślizgowo ceramiką Al_2O_3 , przy różnej sile docisku narzędzia wynoszącej: a) 15 N, b) 70 N i c) 140 N

Tab. 1. Wybrane parametry SGP badanych próbek

parametr SGP	wariant obróbki			
	W1	W2	W3	SZ
Sq	0,283	0,152	0,121	0,281
Ssk	-0,898	-1,24	-1,2	-0,71
Sku	4,36	6,12	8,00	4,61
Sp	1,11	0,672	0,740	1,38
Sv	1,73	1,13	2,48	3,91
Sz	2,84	1,80	3,22	5,29
Sa	0,216	0,115	0,0912	0,217
Sal	0,0256	0,0172	0,132	0,0122
Str	0,0545	0,0439	0,177	0,0319
Spd	750	712	103	652

Badania zostały wykonane na trzech różnych średnicach tarczy: $d_1 = 10$ mm, $d_2 = 15$ mm, $d_3 = 20$ mm. Wykorzystując zależność (1) uzyskano trzy różne prędkości ślizgania $v_1 = 0,16$ m/s; $v_2 = 0,24$ m/s oraz $v_3 = 0,32$ m/s.

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60000} \quad [m/s] \quad (1)$$

gdzie:

- d – średnica tarcia [mm],
- n – prędkość obrotowa [obr/min].

Droga tarcia we wszystkich wariantach wyniosła 282600 mm, co odpowiadało różnym czasom badania w zależności od średnicy drogi tarcia. I tak w przypadku średnicy d_1 było to 30 min, w przypadku średnicy d_2 – 20 min a dla średnicy d_3 czas testu wynosił 15 min. Badania przeprowadzono przy obciążeniu 9,81 [N]. W trakcie testów mierzono siłę tarcia, natomiast po ich przeprowadzeniu określano wielkość pola przekroju zużycia wykorzystując interferometr światła białego Talysurf CCI Light. Pomiarów zużycia dokonywano w czterech oddalonych od siebie o 90° miejscach. Następnie generowano profile w kierunku prostopadłym do śladów zużycia i wykorzystując oprogramowanie TalyMap Gold 6.0 obliczano pole przekroju zużycia. Kolejnym krokiem było obliczenie zużycia objętościowego zgodnie ze wzorem (2)

$$V = \pi \cdot d \cdot S \quad [m^3] \quad (2)$$

gdzie:

- d – średnica tarcia [mm],
- S – pole przekroju zużycia w [mm²].

Powierzchnie nagniatane ślizgowo były powierzchniami anizotropowymi – $Str=0,044 \pm 0,177$ (parametr ten może przyjmować wartości z przedziału 0-1, przy czym wartość zbliżona do zera świadczy o anizotropowości powierzchni, natomiast wartości bliżej 1 o izotropowości powierzchni), o średnim arytmetycznym odchyleniu nierówności powierzchni $Sa = 0,091 \pm 0,216$ μm. Również powierzchnia szlifowana była powierzchnią anizotropową o bardzo zbliżonej wartości parametru Sa do próbek nagniatanych.

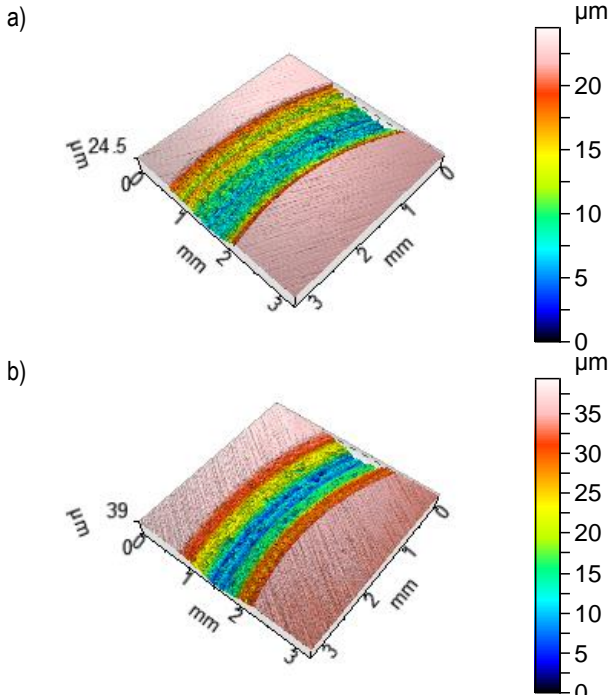
2. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

W tabeli 2 zaprezentowano wyniki pomiarów zużycia objętościowego. Na rysunkach 3-5 przedstawiono widoki izometryczne powierzchni szlifowanych oraz nagniatanych o najmniejszej wartości zużycia objętościowego dla każdej średnicy drogi tarcia. Dodatkowo na rys. 6 zaprezentowano porównanie wielkości zużycia wszystkich powierzchni poddanych testom. Z kolei na rys. 7 przedstawiono przebiegi siły tarcia dla wybranych próbek.

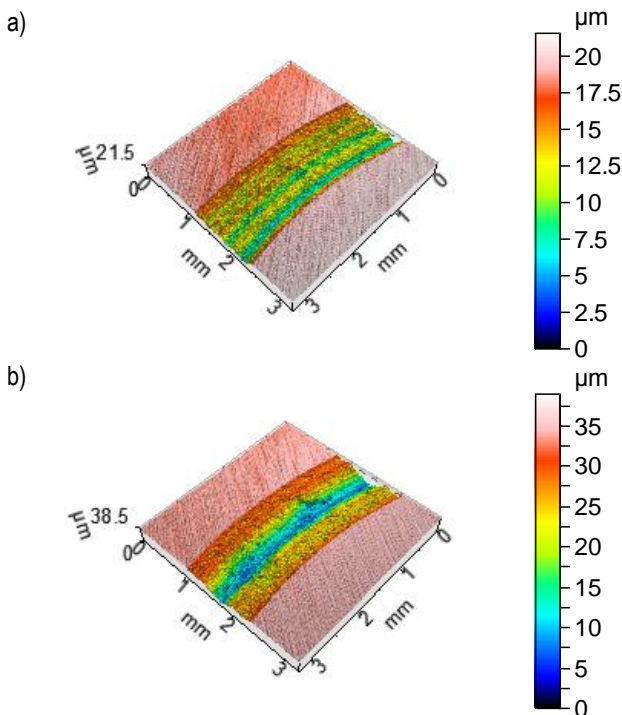
Najmniejsza wartość zużycia objętościowego przy prędkości ślizgania $v_1 = 0,16$ m/s zaobserwowano dla wariantu nagniatania ślizgowego (NS) ceramiką Al_2O_3 z siłą docisku narzędzia $F=140$ N.

Tab. 2. Wyniki badań zużycia objętościowego próbek [mm^3]

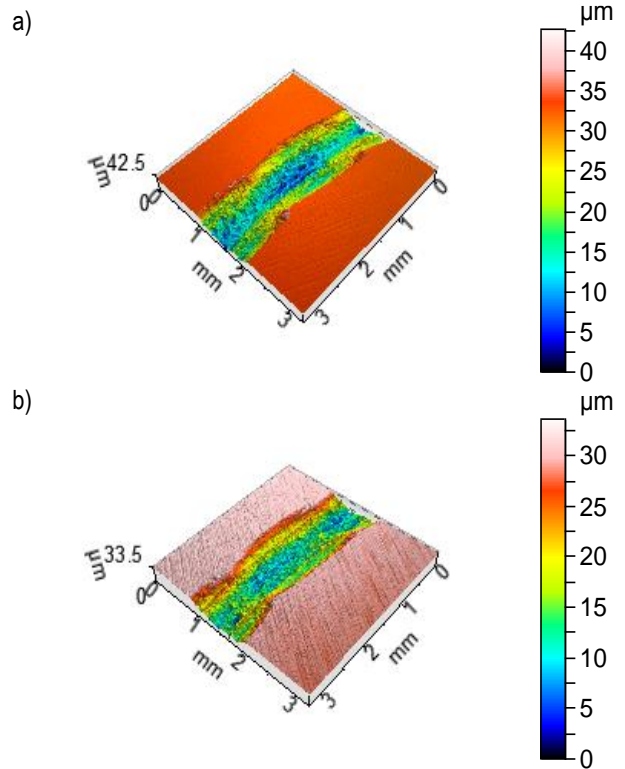
Próbka	Średnica drogi tarcia		
	d=10 mm	d=15 mm	d=20 mm
NS (F-15N)	0,527	0,383	0,635
NS (F-70N)	0,511	0,447	0,592
NS (F-140N)	0,475	0,498	0,574
SZ	0,649	0,762	0,579



Rys. 3. Widoki izometryczne próbek nagniatanej ślizgowo ceramiką Al_2O_3 , (a) oraz szlifowanej (b) przy średnicy drogi tarcia – 10mm



Rys. 4. Widoki izometryczne próbek nagniatanej ślizgowo ceramiką Al_2O_3 , (a) oraz szlifowanej (b) przy średnicy drogi tarcia – 15mm



Rys. 5. Widoki izometryczne próbek nagniatanej ślizgowo ceramiką Al_2O_3 , (a) oraz szlifowanej (b) przy średnicy drogi tarcia – 20mm

Zużycie to wyniosło $V=0,475$ mm^3 . W przypadku dwóch pozostałych wariantów nagniatania ślizgowego wartości zużycia były nieco większe i wyniosły odpowiednio dla siły docisku $F=70$ N – $0,511$ mm^3 a dla siły docisku $F=15$ N – $0,527$ mm^3 . Zużycie objętościowe próbki stalowej było zauważalnie wyższe i wyniosło ono $V=649$ mm^3 .

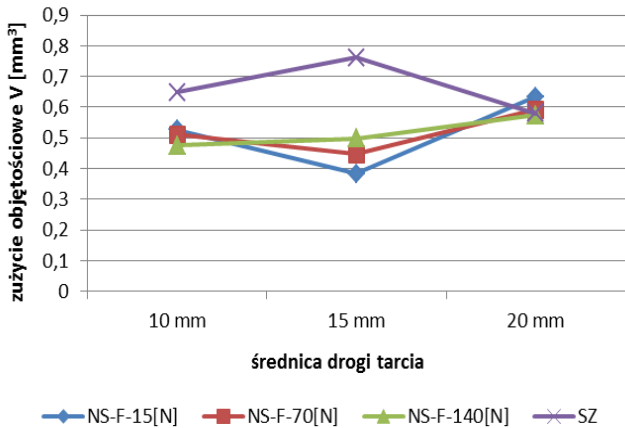
Jeszcze większe różnice pomiędzy wartościami zużycia objętościowego próbek nagniatanych ślizgowo ceramiką Al_2O_3 a próbką szlifowaną zauważono w przypadku prędkości ślizgania $v_2 = 0,24$ m/s. Przy tej prędkości najmniejszym zużyciem charakteryzowała się próbka nagniatana z siłą docisku $F=15$ N. Zużycie objętościowe wyniosło w tym przypadku $V=383$ mm^3 . Dla porównania próbka szlifowana wykazywała dwukrotnie większą wartość zużycia objętościowego.

Z kolei w przypadku prędkości ślizgania $v_3 = 0,32$ m/s zaobserwowano bardzo zbliżone do siebie wartości zużycia objętościowego. Dotyczyło to wszystkich próbek, zarówno nagniatanych jak i próbki szlifowanej. Najmniejszą wartość zużycia objętościowego obliczono dla próbki nagniatanej z siłą docisku $F=140$ N i było to $V=0,574$ m^3 , natomiast wartość największa zużycia objętościowego zaobserwowana dla wariantu nagniatania z siłą docisku $F=15$ N i było to $V=0,635$ m^3 . Zatem różnica między wariantami o najniższej i najwyższej wartości zużycia objętościowego nie przekraczała 10%.

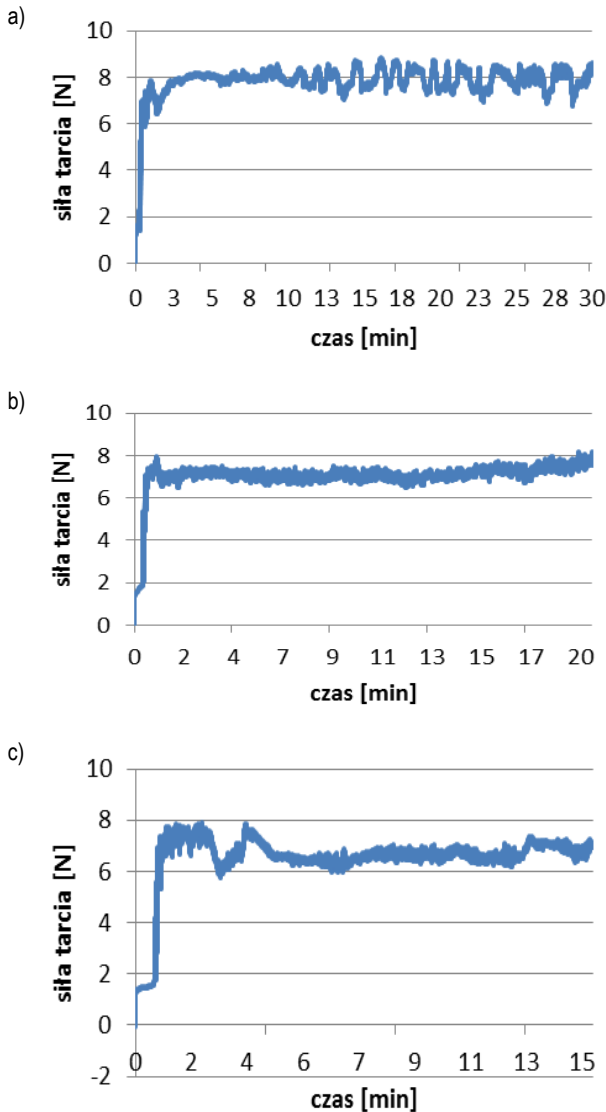
W przypadku próbek nagniatanych ślizgowo, najmniejsze wartości zużycia objętościowego zaobserwowano przy prędkości ślizgania $v_2 = 0,24$ m/s, największe zaś przy prędkości $v_3 = 0,32$ m/s. W przypadku próbki szlifowanej sytuacja była odwrotna. Największym zużyciem charakteryzowały się próbki badane przy prędkości ślizgania $v_2 = 0,24$ m/s, zaś najmniejszym przy prędkości $v_3 = 0,32$ m/s.

Siła tarcia we wszystkich analizowanych wariantach rosła intensywnie w ciągu pierwszych 10-60 sekund testu. Następnie osiągała stabilną wartość siły tarcia na poziomie 7÷9 N. Najwyższe wartości siły tarcia zaobserwowano w przypadku prędkości ślizgania $v_1 = 0,16$ m/s. W tym przypadku średnia wielkość stabilnej wartości

siły tarcia wynosiła ok. 8,3-8,8 N. Z kolei najniższe wartości siły tarcia zarejestrowano przy prędkości ślizgania $v_3 = 0,32$ m/s.



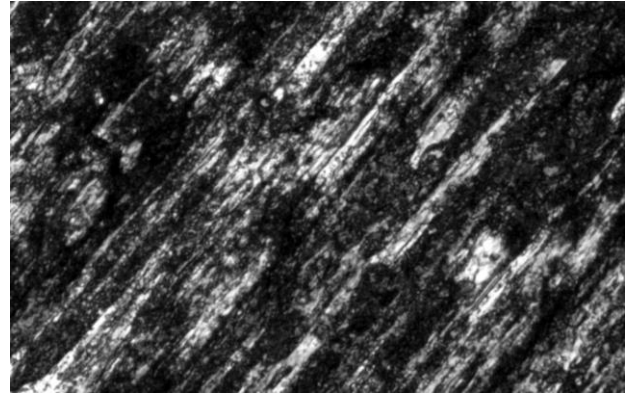
Rys. 6. Przebieg zużycia objętościowego dla poszczególnych średnic drogi tarcia



Rys. 7. Przebieg sił tarcia próbek nagniatanych ślizgowo ceramiką Al_2O_3 , przy sile docisku narzędzia wynoszącej 70 N oraz prędkości ślizgania $v_1 = 0,16$ m/s (a), $v_2 = 0,24$ m/s (b), $v_3 = 0,32$ m/s (c)

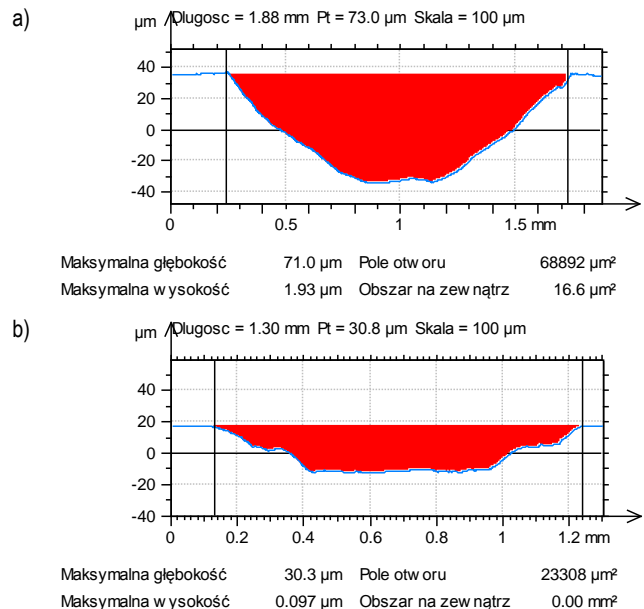
Wartość siły tarcia zawierała się wówczas w granicach $7 \div 7,5$ N. Współczynnik tarcia oscylował w zakresie od $0,85 \div 0,89$ w przypadku prędkości ślizgania $v_1 = 0,16$ m/s, do $0,71 \div 0,76$ w przypadku prędkości ślizgania $v_3 = 0,32$ m/s.

Dominującymi rodzajami zużycia zauważalnymi na poszczególnych próbkach były deformacja plastyczna oraz zużycie ściernie. Na rys. 8 przedstawiono widok powierzchni zużytej przygotowanej poprzez nagniatanie ślizgowe ceramiką Al_2O_3 z siłą docisku narzędzia $F=140$ N.



Rys. 8. Widok powierzchni nagniatanej ślizgowo przy sile docisku narzędzia 140 N oraz prędkości ślizgania $v_2 = 0,24$ m/s (pow. 100x)

W badaniach określano również zużycie kulek współpracujących z powierzchnią tarczy. Zużycie to było największe w centralnej części kulki. Wielkość zużycia była określana poprzez wykonanie przekroju poprzecznego, prostopadłego do kierunku poślizgu po usunięciu kształtu za pomocą sfery. Głębokość zużycia kulek zawierała się pomiędzy 30 a 70 μm . Na rys. 9 zaprezentowano profile zużytych kulek o największej (a) i najmniejszej (b) głębokości zużycia.



Rys. 9. Profile zużytych kulek po usunięciu kształtu za pomocą sfery: a) wariant NS (F-70N) - $d=10$ mm; b) wariant NS (F-70N) - $d=20$ mm

Szerokość zużycia kulek była zbliżona do szerokości współpracujących z nimi tarcz.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania wykazały, że nagniatanie ślizgowe powierzchni ceramiką Al_2O_3 w pewnym zakresie może wpływać na zmianę (zmniejszenie) wartości wielkości zużycia elementów podanych procesowi nagniatania. Szczególnie widoczne było to w przypadku prędkości poślizgu $v_2=0,24$ m/s, przy której zużycie objętościowe próbek nagniatanych było niemal dwukrotnie niższe niż w przypadku próbki szlifowanej. Również w przypadku prędkości poślizgu $v_1=0,16$ m/s nagniatanie ceramiką Al_2O_3 w wszystkich wariantach przyjętej siły docisku narzędzia pozwoliło uzyskać niższe wartości zużycia objętościowego niż w przypadku próbki szlifowanej. Jednak różnice w przypadku tej prędkości ślizgania były mniejsze niż w przypadku prędkości poślizgu v_2 . Z kolei dla prędkości ślizgania $v_3=0,32$ m/s nie zaobserwowano korzystnego wpływu obróbki nagniataniem ceramiką Al_2O_3 w stosunku do obróbki szlifowaniem.

Siła tarcia w przypadku wszystkich wariantów rosła intensywnie w ciągu pierwszej minuty testu osiągając stabilną wartość siły tarcia na poziomie 8,3-8,8 N (wariant najwyższą siłą tarcia) oraz 7÷7,5 N (wariant z najniższą siłą tarcia). Współczynnik tarcia oscylował wówczas w zakresie od 0,85÷0,89 (wariant najwyższą siłą tarcia) do 0,71÷0,76 (wariant z najniższą siłą tarcia).

BIBLIOGRAFIA

1. Jedliński R., Diagnostyka w procesie wyceny wartości pojazdów samochodowych i ustalaniu przyczyn oraz następstw uszkodzeń, „Diagnostyka” 2005, nr 33.
2. Blicharski M., *Inżynieria powierzchni*, WNT, Warszawa 2009.
3. Lawrowski Z., *Tribologia, Tarcie zużywanie smarowanie*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
4. Dzierwa A., *Charakterystyka właściwości tribologicznych stali 36NiCrMo16 po procesie kulowania*, „Mechanik” 2014, nr 11.
5. Korzyński M., *Nagniatanie ślizgowe*, WNT, Warszawa 2014.
6. Dzionk S., Ścibiorski B., Waszczur P., Nagniatanie ślizgowe stali hartowanej Cf53 kulkami ceramicznymi, „Mechanik” 2014, nr 11.
7. Polowski W., Bednarski P., Tobała D., *Obróbka wykończeniowa narzędziami diamentowymi do nagniatania ślizgowego*, „Postępy Nauki i Techniki” 2011, nr 6.
8. PN-EN ISO 25178-2:2012 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) -- Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna -- Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
9. <http://www.katalog.itee.radom.pl/images/stories/karty/62.t-11.pdf> (dostęp:18.02.2016r.).

Influence of sliding burnishing using Al_2O_3 ceramics tool on wear value of steel elements

Paper presents the investigation results of influence of sliding burnishing using Al_2O_3 ceramics on wear value of steel elements. Tribological tests were conducted using a ball-on-disc tribotester. A steel disc of hardness 40 HRC was put in contact with a 100Cr6 steel ball of 6.35 mm diameter. Hardness of ball was 62 HRC. Dry tests, using similar contact conditions were carried out. All tests were at least 3 times repeated. Finishing treatment of disc samples was sliding burnishing using Al_2O_3 ceramics tool. Wear of discs was measured using white light interferometer Talysurf CCI Light. The profiles, taken in four positions, 90° apart, perpendicular to wear track, were integrated using the interferometer software to obtain the wear scan area, then averaged and multiplied for the track length. During tests, the friction force was monitored as a function of time. Dry sliding tests were done at sliding speeds of 0.16 m/s, 0.24 m/s and 0.32 m/s. Load was 10 N. In order to decrease variation of the experimental results, during tests the wear debris was continuously removed from the disc surface.

Autorzy:

dr inż. **Andrzej Dzierwa** – Politechnika Rzeszowska – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, e-mail: adktmiop@prz.edu.pl