

Dr hab. inż. Andrzej Dzierwa, prof. PRz
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
35-959 Rzeszów, ul. Powstańców Warszawy 8
e-mail. adzierwa@prz.edu.pl

Dr inż. Lidia Gałda
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
35-959 Rzeszów, ul. Powstańców Warszawy 8
e-mail. lgktniop@prz.edu.pl

Dr hab. inż. Mirosław Tupaj, prof. PRz
Politechnika Rzeszowska
Wydział Mechaniczno - Technologiczny
37-450 Stalowa Wola, ul. Kwiatkowskiego 4
e-mail. mirek@prz.edu.pl

Dr inż. Kazimiera Dudek
Uniwersytet Rzeszowski
Centrum Innowacyjnych Technologii
35-310 Rzeszów, ul. Pigoń 1
e-mail. kaziadudek@o2.pl

Badania odporności na zużycie wybranych materiałów poddanych procesowi nagniatania ślizgowego

Słowa kluczowe: *struktura geometryczna powierzchni, tarcie, zużycie*

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu procesu nagniatania ślizgowego realizowanego z wykorzystaniem różnych ceramiek na wielkość zużycia oraz siłę tarcia elementów stalowych. Dodatkowo badaniom poddano powierzchnie po procesach szlifowania, docierania oraz polerowania. Skojarzenie materiałowe stanowiły tarcze stalowe ulepszone cieplnie do twardości 40 ± 2 HRC oraz kulki ze stali 100Cr6 o twardości 62 HRC. Badania zrealizowano przy trzech prędkościach poślizgu: 0,16 m/s, 0,32 m/s oraz 0,48 m/s. Badania udowodniły możliwość poprawy wybranych właściwości tribologicznych par trących dzięki zastosowaniu procesu nagniatania ślizgowego a także pozwoliły na ustalenie szeregu zależności pomiędzy parametrami charakteryzującymi strukturę geometryczną powierzchni oraz parametrami tribologicznymi.

Wykaz skrótów i oznaczeń:

F_{30} – wartość siły tarcia po pokonaniu drogi tarcia równej 30 m,
 F_{sr} – wartość średnia siły tarcia,
 H_m – maksymalne wartości mikrotwardości warstwy wierzchniej,
 σ_{max} – maksymalne wartości naprężeń własnych w warstwie wierzchniej,
 S_{al} – długość autokorelacji,
 S_k – wysokość rdzenia,
 S_{ku} – współczynnik nachylenia powierzchni,
 Sp_d – gęstość wierzchołków,

Spk – zredukowana wysokość wierzchołków,
Sq – średnia kwadratowa wysokość powierzchni,
Ssk – współczynnik asymetrii powierzchni,
Svk – zredukowana głębokość wgłębień,
Sz – największa wysokość powierzchni,
VD – zużycie objętościowe tarcz,

1. Wprowadzenie

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 w wyniku zachodzących zmian fizyko – chemicznych elementów, tj. zużycia par trących, zmęczenia materiału, procesów korozyjnych itp. [13]. Zmiany te mogą powodować obniżenie niezawodności, podwyższenie uszkodzalności czy też zmniejszenie wydajności obiektów. Wskutek oddziaływania wymuszeń roboczych przebiegają procesy niszczenia określane zużyciem [36], które powodują nagłą lub stopniową utratę właściwości użytkowych elementów. Ponieważ zużywanie w większości przypadków prowadzi do obniżenia potencjału eksploatacyjnego maszyn i ich elementów powinno się mu przeciwdziałać. Przeciwdziałanie to powinno zacząć się już na etapie konstruowania poprzez dobór odpowiednich elementów zespołu tribomechanicznego umożliwiającego redukcję zużycia w trakcie eksploatacji. Oprócz konstrukcyjnego, stosuje się również szereg sposobów technologicznych zapobiegania zużyciu. Zaliczyć do nich można m.in. [1, 4, 38]:

- stosowanie obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej (np. azotowanie utwardzające, nawęglanie, cyjanowanie),
- stosowanie obróbki plastycznej (np. młotkowanie, dogniatanie),
- stosowanie powłok i pokryć (np. niklowanie chemiczne, napawanie).

Jedną z obróbek powierzchniowych mogących opóźnić procesy zużywania jest proces nagniatania [22]. Obejmuje on m.in. takie sposoby jak rolkowanie [11], krążkowanie, nagniatanie ślizgowe [17] czy też podobne techniki jak np. shot-peening [9, 16]. W przypadku nagniatania ślizgowego twardej i gładkiej element nagniatający dociskany jest do powierzchni obrabianej z odpowiednią siłą wywołując w strefie nagniatania tarcie ślizgowe i w następstwie tego procesu wygładzenie powierzchni oraz korzystne zmiany właściwości warstwy wierzchniej przedmiotu [31]. Przez zastosowanie nagniatania ślizgowego można w warstwie wierzchniej podwyższyć twardość [28, 33], uzyskać bardzo dobrą gładkość powierzchni [14, 25, 30], wytworzyć naprężenia ściskające [2, 32] oraz uzyskać WW bez zanieczyszczeń ściernych. Cechy te korzystnie wpływają na szereg właściwości użytkowych, w tym na zużycie tribologiczne [5, 24], wytrzymałość zmęczeniową [33, 34] i odporność na korozję [28, 37].

W pracy [6] autorzy przeprowadzili badania nagniatania ślizgowego aluminium 6061. Wykazali oni, że poprzez zastosowanie odpowiednich parametrów obróbki możliwa jest redukcja współczynnika tarcia par trących o 48% a ubytku masy o 60-80%. Hamadache i in. [10] proces nagniatania ślizgowego zaaplikowali do stali Rb40. Badania wykazały kilkukrotny wzrost odporności na zużycie w stosunku do próbek po procesie toczenia. Wyniki badań zrealizowanych przez autorów [18] ukazują korzystny wpływ nagniatania ślizgowego na redukcję współczynnika tarcia oraz zużycia polimerów w stosunku do próbek nie nagniatanych. Badaniom poddano poliuretan oraz poliformaldehyd. Redukcja współczynnika tarcia w badaniach tribologicznych w przypadku obu polimerów sięgała maksymalnie 32%, natomiast zużycie uległo zmniejszeniu maksymalnie o 38% w stosunku do próbek po procesie toczenia. Stopień redukcji zarówno współczynnika tarcia jak i zużycia zależał mocno od

wartości wyjściowej chropowatości powierzchni. Revankar i in. [26] badali właściwości tribologiczne stopu tytanu Ti-6Al-4V. Badano powierzchnie po procesie toczenia oraz po procesie nagniatania ślizgowego z różnymi parametrami wejściowymi procesu. Wykazano, że w przypadku najkorzystniejszych parametrów nastąpiła redukcja zużycia o 52% a redukcja współczynnika tarcia o 64% w stosunku do próbek toczonej. Z kolei autorzy pracy [24] badali odporność na zużycie dwufazowych stopów stali HSLA po procesie nagniatania ślizgowego. Zaobserwowano, że większą redukcją zużycia charakteryzowały się próbki nagniatane z większą siłą docisku. Celem pracy [35] było określenie możliwości ograniczenia uszkodzeń stali 316L spowodowanych zużyciem udarowym bez naruszania struktury materiału. Jako obróbkę wykończeniową powierzchni stali zastosowano nagniatanie ślizgowe. Badania wykazały redukcję objętości śladów zużycia o 53-62% w stosunku do próbek nie nagniatanych. Janczewski i in. [12] badali próbki polietylenowe o niskiej gęstości i wysokiej masie cząsteczkowej (LDPE). Obróbkę wykończeniową stanowiły procesy frezowania i nagniatania ślizgowego. Wykazano, że nagniatanie ślizgowe modyfikuje powierzchnię LDPE i radykalnie obniża wielkość zużycia, o ok. 58% w stosunku do próbek frezowanych.

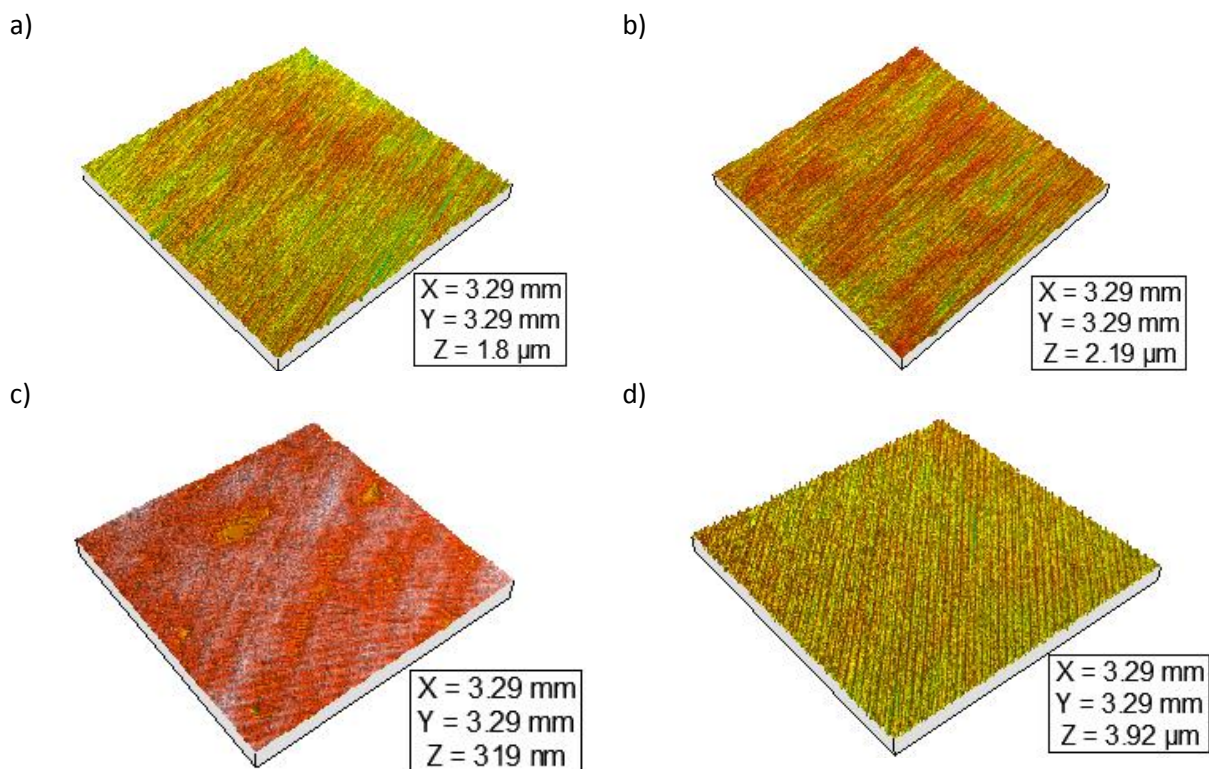
W badaniach wpływu nagniatania ślizgowego na właściwości tribologiczne skojarzeń trących, w zdecydowanej większości przypadków jako element nagniatający stosuje się diament lub kompozyt diamentowy, co sprawia, że jest to rozwiązanie stosunkowo drogie. Niewiele jest wzmianek wykorzystania tańszych elementów nagniatających aplikowanych w szczególności na obrabiarki sterowane numerycznie do poprawy tychże właściwości. Możliwość szerszego zastosowania materiałów ceramicznych [3, 26] do ich poprawy niewątpliwie prowadziłaby do redukcji kosztów związanych z procesem nagniatania w szczególności w przypadku uzyskania jakości powierzchni na poziomie podobnym do tego otrzymywanego w wyniku stosowania końcówek diamentowych. Pozwoliłaby również na wyeliminowanie lub ograniczenie pracochłonnych operacji obróbki wykończeniowej jak np. honowanie, szlifowanie, polerowanie czy też dogładzanie.

W niniejszej pracy przedstawiono badania wpływu procesu nagniatania ślizgowego realizowanego z wykorzystaniem różnych ceramiek na wybrane właściwości tribologiczne skojarzeń stal – stal. Dodatkowo analizie porównawczej poddano obróbki standardowo wykorzystywane w budowie maszyn jak polerowanie, szlifowanie i docieranie.

2. Metodyka badań

Badania tribologiczne przeprowadzono na testerze tribologicznym T-11 trzpień / kulka – tarcza, w układzie kulka – tarcza. Skojarzenie tribologiczne stanowiła nieruchoma kulka łożyskowa o twardości 62 ± 2 HRC i tarcza wykonana ze stali 42CrMo4 o twardości 40 ± 2 HRC. Obróbkę wykończeniową tarcz stanowiły procesy nagniatania ślizgowego wykonane różnymi rodzajami kulek ceramicznych (Al_2O_3 , SiC, WC). Nagniatanie wykonywano z wykorzystaniem pionowego centrum obróbczego Hass VF-3 stosując 3 różne siły docisku narzędzia: 30, 70 i 100 N. Zastosowano pojedyncze przejście narzędzia przy stałym posuwie wynoszącym 0,05 mm. Dodatkowo badaniom poddano tarcze w których obróbkę wykończeniową stanowiły procesy szlifowania, polerowania oraz docierania. Widoki izometryczne powierzchni wybranych tarcz zaprezentowano na rys. 1. Z kolei w tabeli 1 zestawiono wybrane parametry struktury geometrycznej powierzchni badanych tarcz [20]. W przypadku tarcz po procesie nagniatania ślizgowego zastosowano następujące oznaczenia:

- Al_{30} , Al_{70} oraz Al_{100} gdy elementem nagniatającym była ceramika Al_2O_3 (indeksy oznaczają zastosowaną siłę docisku przy nagniataniu),
- SiC_{30} , SiC_{70} , SiC_{100} gdy elementem nagniatającym była ceramika SiC,
- WC_{30} , WC_{70} , WC_{100} gdy elementem nagniatającym była ceramika WC.



Rys. 1. Widoki izometryczne powierzchni badanych tarcz: a) nagniatana Al₇₀, b) nagniatana SiC₇₀, c) polerowana, d) szlifowana

Tabela 1. Wybrane parametry struktury geometrycznej powierzchni badanych tarcz

	Sq	Ssk	Sku	Sz	Sal	Spd	Sk	Spk	Svk
Al ₃₀	0,28	-0,898	4,36	2,84	0,0256	750	0,527	0,131	0,461
Al ₇₀	0,142	-1,24	6,12	1,8	0,0172	612	0,336	0,1741	0,325
Al ₁₀₀	0,186	-1,116	4,98	2,44	0,0185	672	0,426	0,148	0,389
SiC ₃₀	0,227	-1,07	5,14	2,56	0,214	304	0,385	0,1335	0,395
SiC ₇₀	0,117	-0,801	4,71	2,19	0,115	493	0,222	0,0538	0,17
SiC ₁₀₀	0,192	-0,569	3,89	1,98	0,166	468	0,351	0,0944	0,301
WC ₃₀	0,207	-0,951	5,9	3,76	0,0107	790	0,445	0,144	0,35
WC ₇₀	0,3	-0,321	3,86	3,46	0,379	574	0,465	0,119	0,387
WC ₁₀₀	0,226	-0,869	4,11	2,86	0,189	687	0,458	0,123	0,379
SZ	0,258	-0,277	3,81	3,92	0,0086	843	0,603	0,123	0,333
POL	0,0189	-0,17	2,9	0,319	0,214	1170	0,0319	0,01	0,0181
DOC	0,094	-0,59	4,39	1,3	0,0264	1020	0,198	0,0608	0,137

Dodatkowo procesy szlifowania, polerowania i docierania oznaczono odpowiednio przez „SZ”, „POL” i „DOC”. Droga tarcia we wszystkich wariantach wyniosła 282,6 m, co odpowiadało 30 minutom testu. Badania przeprowadzono przy obciążeniu 9,81 N oraz trzech prędkościach poślizgu: 0,16; 0,32 i 0,48 m/s. Podczas testów mierzono siłę tarcia, natomiast po ich przeprowadzeniu określano wielkość zużycia przy użyciu interferometru światła białego Talysurf CCI Light. Pomiarów zużycia dokonywano w czterech oddalonych od siebie o 90⁰ miejscach, uzyskując obszary 3,3 mm x 3,3 mm. Następnie w każdym z nich generowano profile w kierunku prostym do śladów zużycia i wykorzystując

oprogramowanie TalyMap Gold 6.0 obliczono pole przekroju zużycia. Kolejnym krokiem było obliczenie zużycia objętościowego tarcz zgodnie ze wzorem (1)

$$VD = \pi dS \text{ [mm}^3\text{]} \quad (1)$$

gdzie:

d – średnica tarcia [mm],

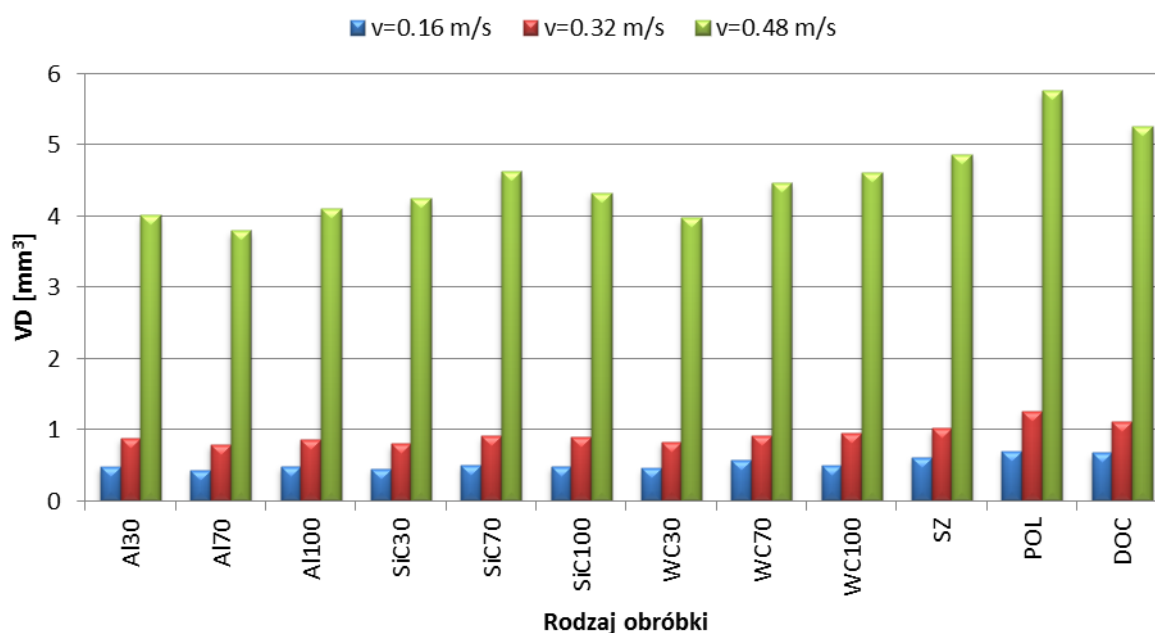
S – pole przekroju zużycia w [mm²].

Wszystkie testy przeprowadzono z minimum trzykrotną powtarzalnością. Pomiarów naprężeń własnych dokonywano przy pomocy przenośnego dyfraktometru rentgenowskiego Xstress 3000 G3R. W pomiarach zastosowano metodę $\sin 2\psi$ [7] podczas której kąt padania ψ znajdował się w zakresie od -45° do $+45^\circ$ podzielonym na 7 pozycji pochylenia. Czas ekspozycji ustawiono na 40 s. Głębokość penetracji wynosiła około 10 μm . Do pomiarów wykorzystano oprogramowanie XTronic. Dla każdej próbki wyznaczano naprężenia własne w 2 kierunkach prostopadłym i równoległym do śladów obróbkowych.

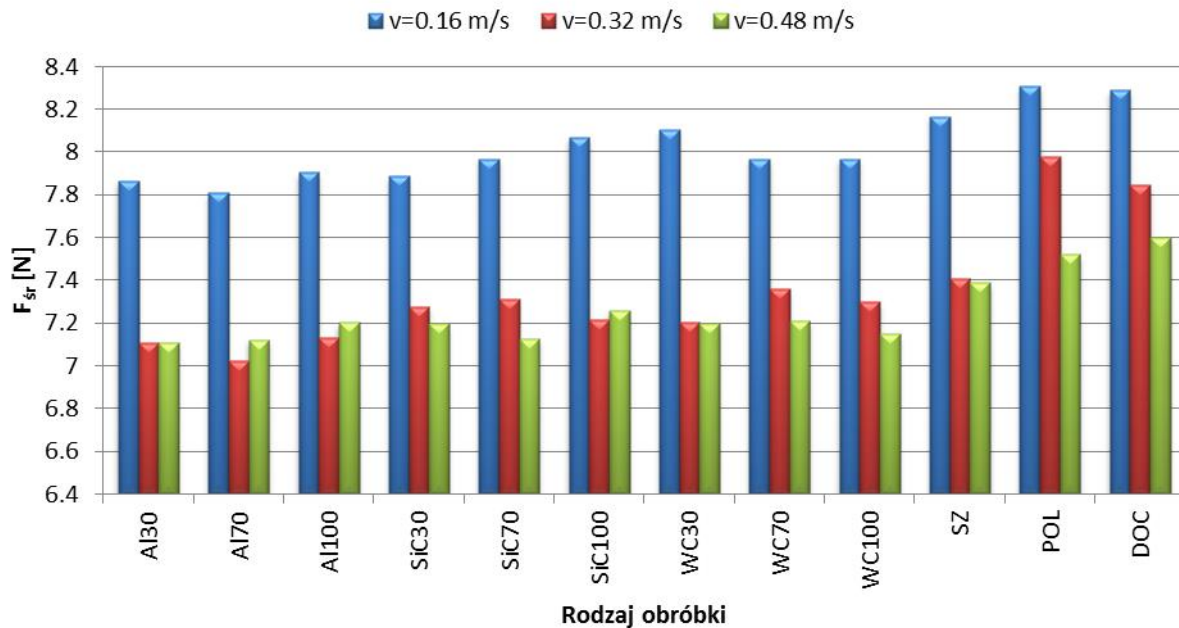
Pomiary mikrotwardości przeprowadzono na mikrotwardościomierzu Brivisor KL2 z elektroniką pomiarową HME metodą statycznego wciskania wgłębnika sposobem Vickersa [21], przy stałym obciążeniu $P = 4,9 \text{ N}$. Czas oddziaływania wgłębnika w kształcie foremnego ostrosłupa czworokątnego o kącie dwuściennym 136° wynosił około 15 s. Mikrotwardość warstwy wierzchniej badanych próbek zmierzono na zglądach ukośnych wykonanych pod kątem 5° .

3. Prezentacja oraz omówienie wyników badań

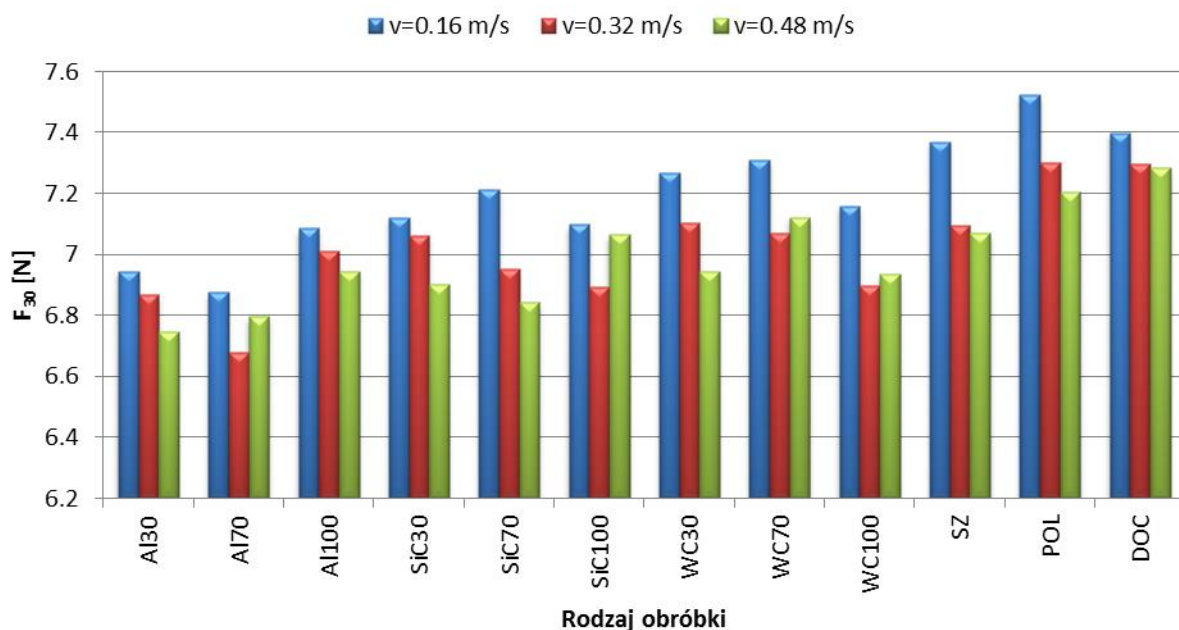
Na rysunkach 2-4 zaprezentowano wyniki otrzymanych badań. Kolejno przedstawiono średnie wartości zużycia objętościowego badanych powierzchni tarcz dla wszystkich prędkości ślizgania (rys. 2), średnie wartości siły tarcia uzyskane po procesie docierania (rys. 3) oraz wartości siły tarcia uzyskane po pokonaniu drogi tarcia równej 30 m (rys. 4). Z kolei w tabeli 2 zaprezentowano maksymalne wartości naprężeń własnych σ_{max} oraz mikrotwardości H_m a także przedziały ufności $u(\sigma_{\text{max}})$, $u(H_m)$ wszystkich próbek



Rys. 2. Wyniki badań zużycia objętościowego tarcz



Rys. 3. Wyniki badań średnich wartości siły tarcia



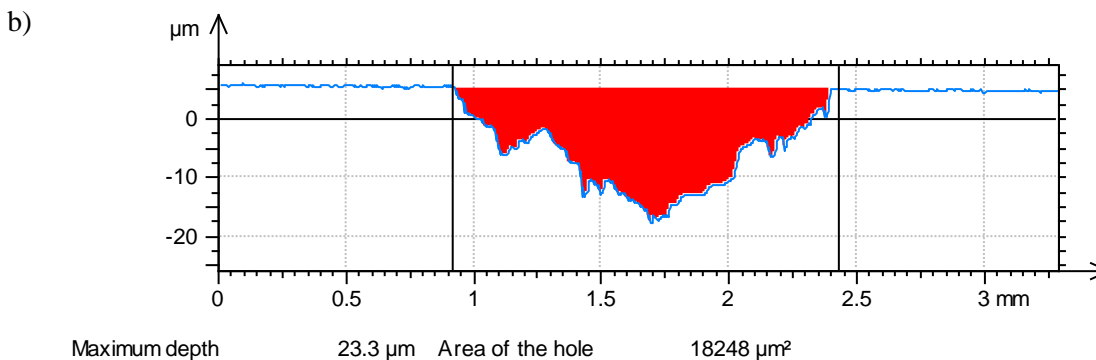
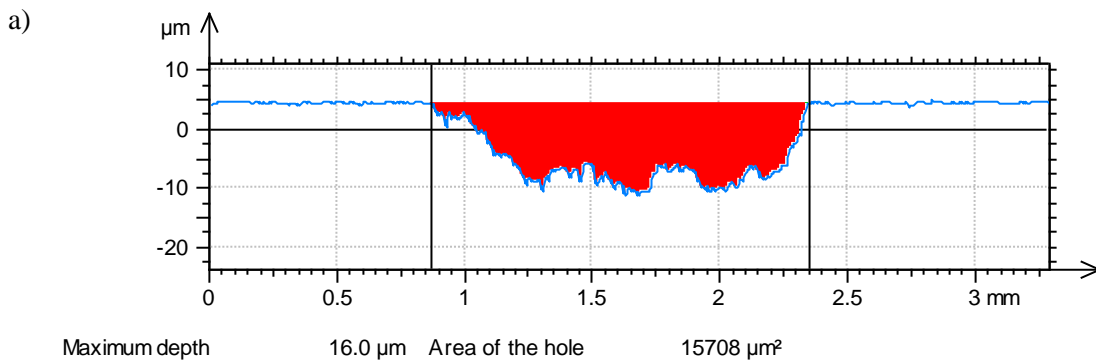
Rys. 4. Wyniki badań siły tarcia uzyskane po pokonaniu drogi tarcia równej 30 m

poddanych badaniom tribologicznym. Na rysunku 5 przedstawiono pola przekroju zużycia wybranych tarcz (Al₇₀ oraz POL), a na rys. 6 przykładowe przebiegi siły tarcia dla tych skojarzeń przy prędkości poślizgu równej 0,16 m/s.

Przy najmniejszej prędkości poślizgu $v = 0,16$ m/s największe zużycie objętościowe zaobserwowano dla skojarzenia z tarczą polerowaną. Wartość parametru VD wyniosła w tym przypadku $0,694 \text{ mm}^3$ i korespondowała z najwyższą wartością siły tarcia uzyskaną po pokonaniu drogi tarcia równej 30 m (7,522 N) oraz najwyższą średnią wartością siły tarcia F_{sr} (8,308 N). Najmniejszą wartość parametru VD przy prędkości poślizgu $v = 0,16$ m/s obliczono dla próbki nagniatanej Al₇₀ i było to $0,439 \text{ mm}^3$. W przypadku tej próbki odnotowano również najmniejszą średnią wartość siły tarcia F_{sr} , która wyniosła 7,808 N.

Tabela 2. Maksymalne wartości naprężeń własnych σ_{\max} oraz mikrotwardości Hm powierzchni badanych tarcz

Próbka	σ_{\max} [MPa]	$u(\sigma_{\max})$ [MPa]	Hm [HV]	$u(Hm)$ [HV]
Al ₃₀	-212,6	±18,6	380,1	±11,6
Al ₇₀	-298,1	±17,8	389,4	±14,2
Al ₁₀₀	-309,8	±26,2	404,2	±14,8
SiC ₃₀	-270,3	±18,6	399,6	±13,4
SiC ₇₀	-301,6	±24,8	388,2	±11,6
SiC ₁₀₀	-376,1	±28,6	399,7	±12,2
WC ₃₀	-288,7	±26,1	382,4	±13,9
WC ₇₀	-344,6	±28,7	403,5	±12,2
WC ₁₀₀	-349,4	±24,4	398,8	±11,4
SZ	-37,2	±8,7	381,4	±12,2
POL	-179,2	±12,4	385,2	±14,6
DOC	-96,8	±10,2	384,1	±13,8

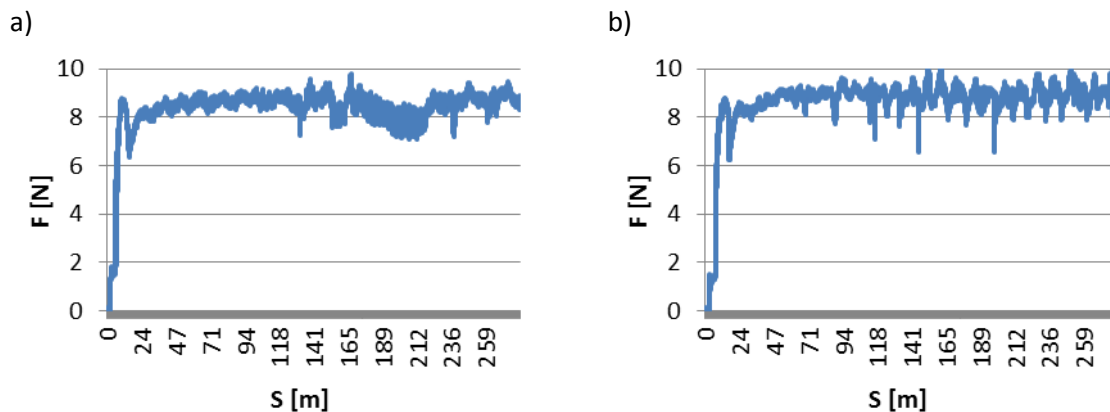


Rys. 5 Pola przekroju poprzecznego zużycia tarcz Al₇₀ (a) oraz POL (b) przy prędkości poślizgu równej 0,16 m/s,

Współczynnik tarcia μ zawierał się w granicach od 0,79 (tarcza nagniatana Al₇₀) do 0,85 (tarcza polerowana).

Wzrost prędkości poślizgu do 0,32 m/s spowodował wzrost wartości zużycia objętościowego poszczególnych próbek oraz niewielki spadek średniej wartości siły tarcia oraz wartości siły tarcia uzyskanej po pokonaniu drogi tarcia równej 30 m. Podobnie jak przy najmniejszej prędkości poślizgu najmniejszą wartością zużycia objętościowego charakteryzowała się próbka Al₇₀ i było to 0,796 mm³. Również średnia wartość siły tarcia F_{sr} oraz parametr F_{30} były w przypadku próbki Al₇₀ najmniejsze, odpowiednio 7,022 N oraz 6,677 N. Najwyższymi wartościami poszczególnych parametrów charakteryzowała się próbka

polerowana. Parametr VD w przypadku tej próbki wyniósł $1,262 \text{ mm}^3$. Współczynnik tarcia μ zmalał w stosunku do najmniejszej prędkości poślizgu i zawierał się w granicach od 0,72 (tarcza nagniatana Al_{70}) do 0,81 (tarcza polerowana).



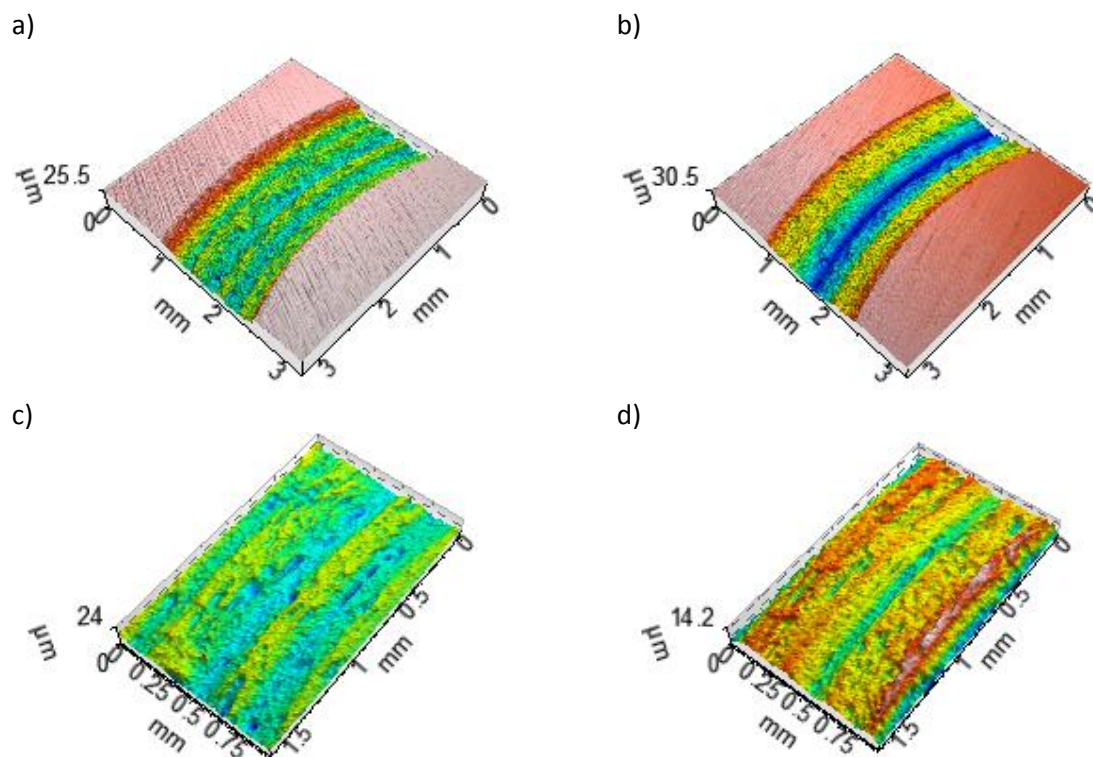
Rys. 6. Przebiegi siły tarcia par trących zawierających próbki Al_{70} (a) oraz POL (b) przy prędkości poślizgu równej $0,16 \text{ m/s}$

Wzrost prędkości poślizgu do $0,48 \text{ m/s}$ spowodował bardzo wyraźny wzrost wartości zużycia objętościowego poszczególnych próbek w porównaniu do zużycia zaobserwowanego przy niższych prędkościach poślizgu. Najmniejszym zużyciem objętościowym przy tej prędkości poślizgu charakteryzowała się ponownie próbka Al_{70} , jednakże najniższe wartości F_{sr} oraz F_{30} zaobserwowano w przypadku próbki Al_{30} . Parametr VD próbki Al_{70} wyniósł $3,796 \text{ mm}^3$. Najwyższą wartość zużycia objętościowego zmierzono ponownie w przypadku próbki polerowanej i było to $5,759 \text{ mm}^3$. Z kolei najwyższe wartości parametrów F_{sr} oraz F_{30} odnotowano w przypadku próbki docieranej i było to odpowiednio $7,598 \text{ N}$ oraz $7,284 \text{ N}$. Dolna wartość współczynnika tarcia była na podobnym poziomie jak przy prędkości $0,32 \text{ m/s}$ natomiast górna wartość uległa niewielkiemu zmniejszeniu w stosunku do tej prędkości. Współczynnik tarcia zawierał się w granicach od 0,72 (tarcza nagniatana Al_{30}) do 0,77 (tarcza docierana).

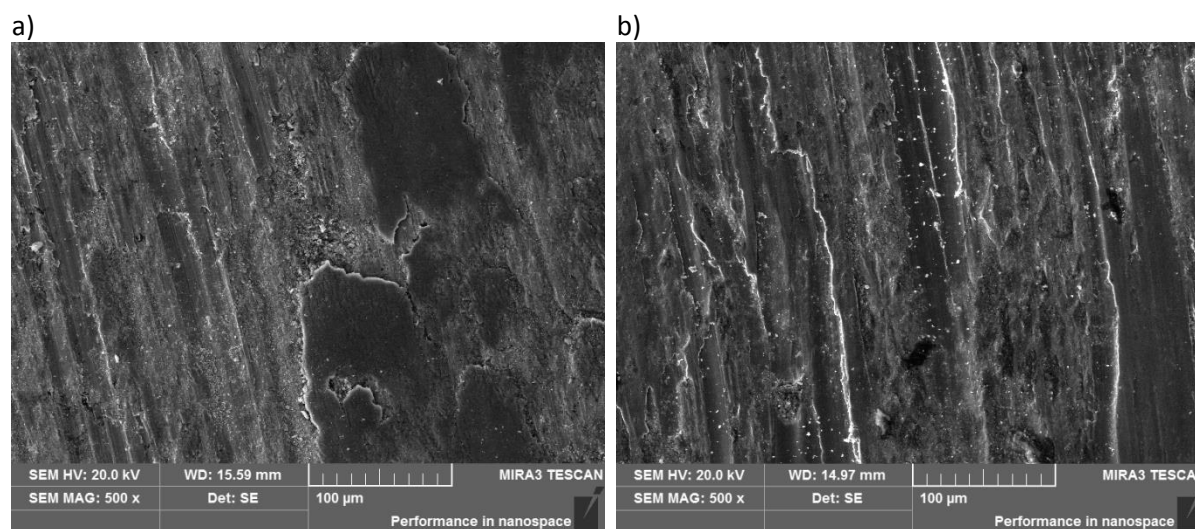
Najwyższą wartością maksymalnych naprężeń ściskających charakteryzowały się próbki nagniatane SiC_{100} oraz WC_{100} . Zmierzone wartości tych próbek to odpowiednio $-376,1 \text{ MPa}$ oraz $-349,6 \text{ MPa}$. Z kolei najwyższą maksymalną wartością mikrotwardości powierzchni charakteryzowała się struktura geometryczna po nagniataniu kulką Al_{100} . Pomimo tego, wspomniane próbki charakteryzowały się stosunkowo dużym zużyciem objętościowym tarcz pośród próbek poddanych procesowi nagniatania ślizgowego. Najniższymi wartościami parametru VD charakteryzowały się tarcze Al_{70} i SiC_{30} przy prędkości poślizgu $0,16 \text{ m/s}$, ponownie tarcze Al_{70} i SiC_{30} przy prędkości poślizgu $0,32 \text{ m/s}$ oraz tarcze Al_{70} i WC_{30} przy prędkości poślizgu $0,48 \text{ m/s}$.

Aby zilustrować mechanizm zużycia zużytych powierzchni, przeprowadzono analizę topografii powierzchni oraz analizę z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego Vega3. Analiza topografii powierzchni wykazała utworzenie się jednokierunkowej tekstury po badaniach tribologicznych. Uzyskane wartości parametru Str (wskaźnik tekstury powierzchni) zawierały się w zakresie $6,98\text{--}13,06\%$ i są to wartości charakterystyczne dla powierzchni anizotropowych po zużyciu ściernym. Rysunek 7 przedstawia widoki izometryczne tarcz Al_{70} oraz POL po badaniach tribologicznych, a także wycinki zużytych powierzchni tych tarcz. W przypadku tarczy nagniatanej Al_{70} parametr Str wyniósł $8,44\%$, a dla tarczy polerowanej $9,13\%$.

Również analiza SEM (rysunek 8) potwierdza dominujący mechanizm zużycia ściernego. W jego wyniku nastąpiła całkowita zmiana struktury geometrycznej powierzchni. Ślady zużycia na powierzchni tarcz zawierają wydłużone rozciągające się zgodnie z kierunkiem ślizgania kraterki oraz wygładzone obszary z podłużnymi rowkami powstałe w wyniku deformacji plastycznej. Zaobserwowano również występowanie rozwarstwień na zużytej powierzchni dysków.

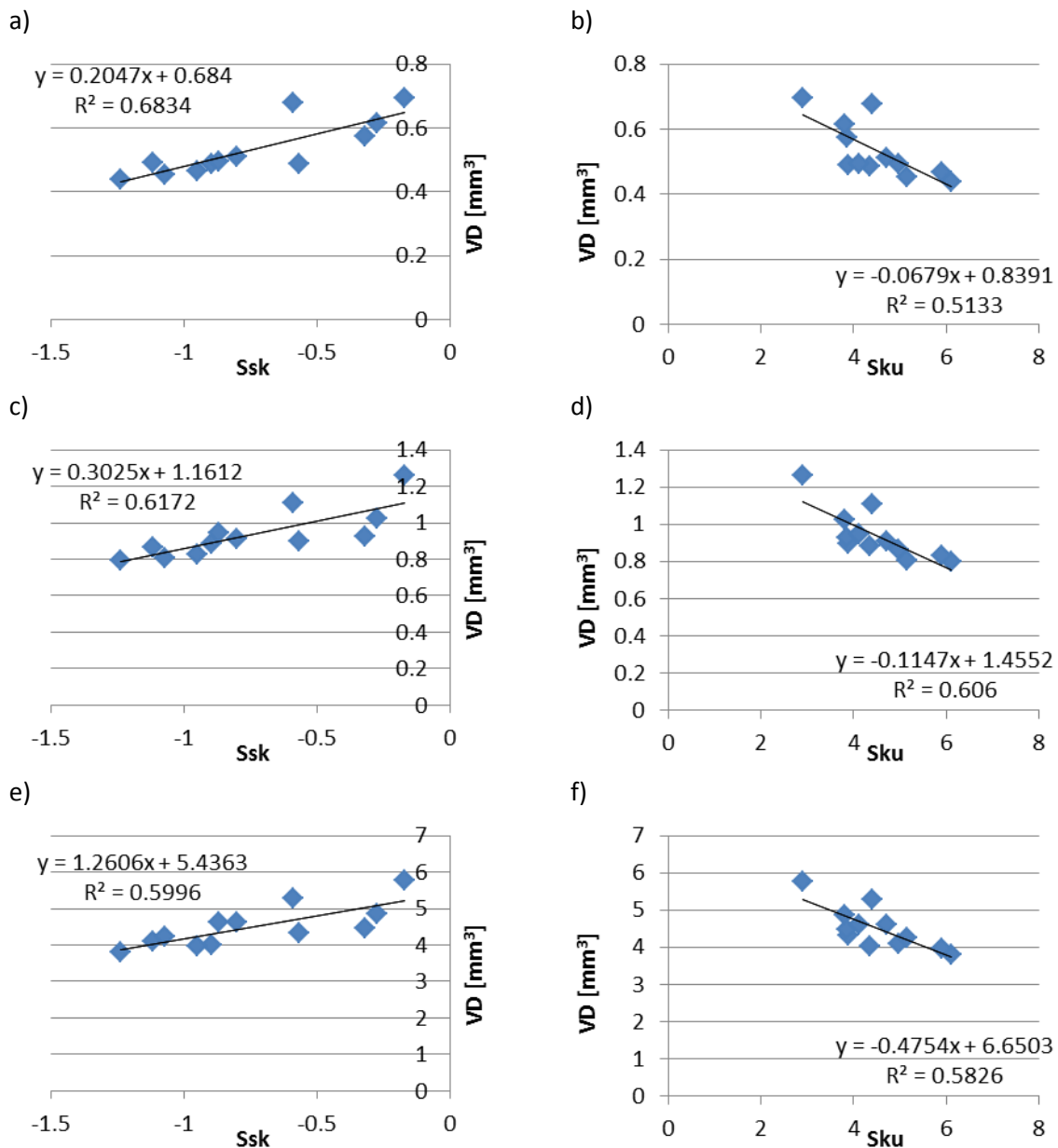


Rys. 7. Widoki izometryczne tarcz Al₇₀ (a) i POL (b) po badaniach tribologicznych oraz wycinki zużytych powierzchni tarcz Al₇₀ (c) i POL (d)



Rys. 8. Zdjęcia SEM zużytych tarcz Al₇₀ (a) oraz POL (b) przy prędkości ślizgania $v = 0,16$ m/s

Do poszukiwania związków pomiędzy parametrami tribologicznymi a parametrami charakteryzującymi strukturę geometryczną powierzchni użyto współczynnika korelacji liniowej R . Współczynnik ten zawiera się w przedziale $[-1, 1]$. Im większa jego wartość bezwzględna, tym silniejsza jest zależność liniowa między zmiennymi. Wartość $R = 1$ lub $R = -1$ informuje o pełnej zależności liniowej między cechami, natomiast $R = 0$ wskazuje na brak takiej zależności. Silną zależność liniową występującą przy wszystkich prędkościach ślizgania znaleziono dla par VD – Ssk (skośność powierzchni) oraz VD – Sku (kurtoza powierzchni). Zależności te przedstawiono na rysunku 9. Współczynnik skośności Ssk , zwany również współczynnikiem asymetrii charakteryzuje symetrię rozkładu rzędnych wysokości chropowatości względem płaszczyzny średniej [15]. Wg [27] ujemna wartość tego współczynnika wskazuje na powierzchnię o wzniesieniach płaskowyżowych, zaś dodatnia na powierzchnię o wzniesieniach w kształcie zaostrowym. Wszystkie tarcze poddane badaniom



Rys. 9. Zależności pomiędzy zużyciem objętościowym VD a parametrami Ssk (a, c, e) oraz Sku (b, d, f) przy prędkościach poślizgu: a, b) $v = 0,16$ m/s; c, d) $v = 0,32$ m/s; e, f) $v = 0,48$ m/s

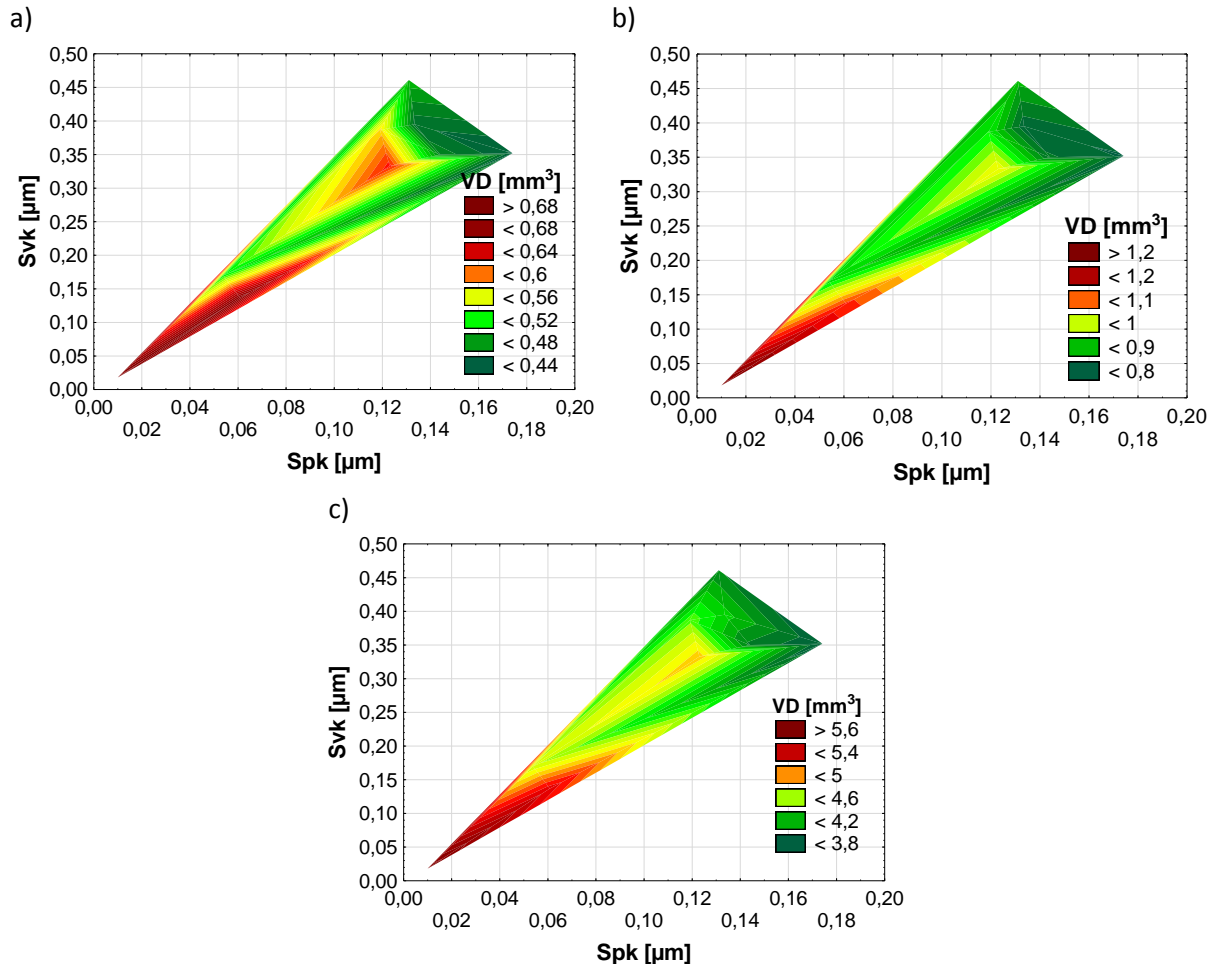
charakteryzowały się ujemną wartością parametru Ssk, który przyjmował wartości w zakresie od $-0,17$ (tarcza polerowana) do $-1,24$ (tarcza po nagniataniu Al₇₀). Z kolei parametr Sku jest określany miarą smukłości krzywej rozkładu rzędnych. Dla rozkładu normalnego rzędnych profilu $Sku = 3$ [8]. Próbki poddane badaniom tribologicznym charakteryzowały się rozkładem normalnym rzędnych lub rozkładem zbliżonym do normalnego. W przypadku zużycia objętościowego tarcz i parametru Ssk współczynnik korelacji liniowej R przyjmował wartości od $0,77$ (dla $v = 0,48$ m/s) do $0,83$ (dla $v = 0,16$ m/s), a dla VD i parametru Sku współczynnik korelacji liniowej R zawierał się między $-0,72$ (dla $v = 0,16$ m/s) i $-0,78$ (dla $v = 0,32$ m/s) i była to zależność odwrotnie proporcjonalna. Najmniejsze wartości zużycia objętościowego tarcz osiągnęto dla minimalnych wartości parametru Ssk oraz maksymalnych wartości parametru Sku. Ujemna skośność może poprawić warunki kontaktu przez zmniejszanie wskaźnika plastyczności, co z kolei może przyspieszyć redukcję zużycia objętościowego wraz ze wzrostem wartości parametru Sku i zmniejszeniem wartości parametru Ssk. Powierzchnie o niskiej wartości Ssk i wysokiej wartości Sku mogą stanowić „pułapki” do przechwytywania cząstek zużycia. W przypadku badań w warunkach tarcia technicznie suchego oraz w temperaturze otoczenia, cząsteczki zużycia mają zazwyczaj od ok. 10 do 100 μm . Wydaje się, że część cząstek była na tyle mała, że doliny struktury geometrycznej powierzchni zadziaływały jak pułapki na część produktów zużycia i przyczyniły się do zmniejszenia intensywności zużycia. Inaczej sytuacja mogłaby wyglądać w przypadku badań w podwyższonej temperaturze a kompleksowym badaniom dotyczącym struktury produktów zużycia powstałych w realizacji procesu tarcia poświęcone są prace autorów [39, 40].

Silną zależność liniową występującą przy wszystkich prędkościach ślizgania znaleziono również dla zużycia objętościowego oraz parametrów charakteryzujących krzywą udziału materiałowego: Spk (zredukowana wysokość wzniesień), Svk (zredukowana wysokość wgłębień) i Sk (wysokość rdzenia). Zależności pomiędzy Spk i Svk zaprezentowano na rys. 10. Obszary zaznaczone kolorem czerwonym informują o większej wartości parametru VD, a kolorem zielonym (a w szczególności kolorem ciemnozielonym) o mniejszym zużyciu tarcz. Analizując otrzymane wyniki, można zauważyć, że zwiększeniu wartości parametrów Spk i Svk odpowiadało zmniejszenie zużycia objętościowego tarcz. Parametr Svk pozwala na ocenę właściwości smarnych powierzchni i jest miarą zdolności utrzymywania płynu przez powierzchnie ślizgowe. Z kolei wyższe wartości parametru Spk charakteryzują powierzchnie o wysokich szczytach, przez co obszar początkowego styku jest stosunkowo mały, a siła przyłożona na jednostkę powierzchni duża. Dlatego też parametr Spk może reprezentować nominalną wysokość materiału, który zostanie usunięty w początkowym etapie procesu eksploatacji – docierania [19]. Zwiększenie wartości Spk prowadzi jednak do zmniejszenia rzeczywistej powierzchni styku, co może ograniczać wpływ oddziaływań o charakterze adhezyjnym. Autorzy pracy [29] sugerują, że istotniejszy jest stosunek Spk/Svk, niż wartość tych parametrów oddzielnie. We wszystkich badanych strukturach geometrycznych powierzchni parametr Svk był większy niż Spk przez co skojarzenia wykazywały tendencję do redukcji współczynnika tarcia (szczególnie przy ujemnej wartości parametru Ssk). Istotna wydaje się być szczególnie zależność między parametrem Sk a zużyciem objętościowym tarczy. Parametr Sk reguluje właściwości tribologiczne obrabianych elementów po okresie docierania. W przypadku tarcz o niewielkiej wysokości nierówności ma to szczególne znaczenie gdyż okres docierania we wszystkich badanych skojarzeniach nie przekraczał 5 minut. W związku z tym parametr ten może być brany pod uwagę pod kątem planowania struktury geometrycznej powierzchni o pożądanym właściwościach tribologicznych.

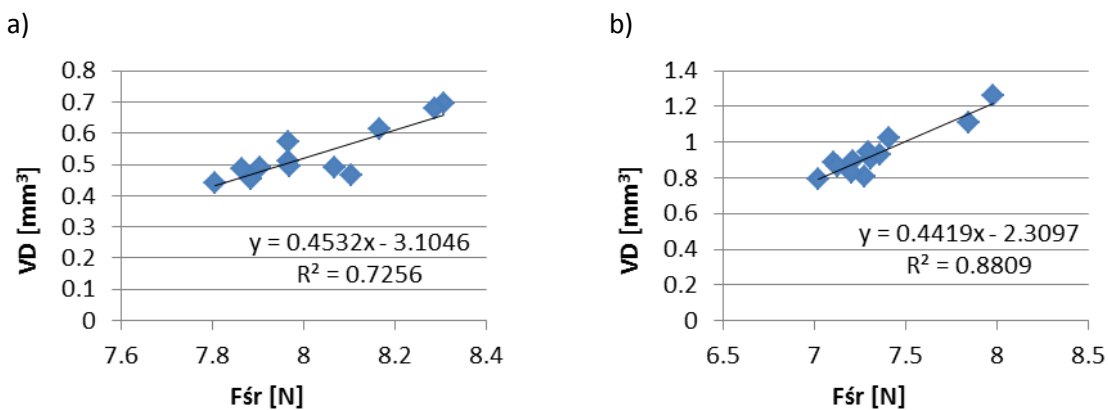
Silną zależność zaobserwowano również pomiędzy zużyciem objętościowym a parametrem Spd (gęstość wierzchołków nierówności powierzchni). Parametr ten określa

zagęszczenie wzniesień nierówności na badanej powierzchni. Im większa wartość parametru Spd, tym większa powierzchnia nośna [23], w szczególności w połączeniu z ujemną wartością parametru Ssk.

Mocną zależnością liniową charakteryzowało się zużycie objętościowe tarcz oraz średnia wartość siły tarcia (rys. 11). W zależności od prędkości poślizgu współczynnik



Rys. 10. Zależności pomiędzy zużyciem objętościowym VD a wartościami parametrów Spk i Svk przy prędkościach poślizgu: $v = 0,16 \text{ m/s}$ (a), $v = 0,32 \text{ m/s}$ (b), $v = 0,48 \text{ m/s}$ (c)



Rys. 11. Zależności pomiędzy zużyciem objętościowym VD a średnią wartością siły tarcia F_{sr} przy prędkościach poślizgu: $v = 0,16 \text{ m/s}$ (a) oraz $v = 0,32 \text{ m/s}$ (b)

korelacji liniowej wynosił: $R = 0,85$ przy $v = 0,16$ m/s; $R = 0,94$ przy $v = 0,32$ m/s oraz $R = 0,84$ przy $v = 0,48$ m/s. Również wartości siły tarcia uzyskane po pokonaniu drogi tarcia równej 30 m były silnie skorelowane ze zużyciem objętościowym tarcz. W tym przypadku w zależności od prędkości poślizgu współczynnik korelacji liniowej pomiędzy VD a F_{30} wynosił: $R = 0,85$ przy $v = 0,16$ m/s; $R = 0,73$ przy $v = 0,32$ m/s oraz $R = 0,78$ przy $v = 0,48$ m/s. Zużycie objętościowe tarcz nie było z kolei znacząco skorelowane z maksymalną wartością naprężeń własnych (współczynnik korelacji liniowej w zakresie: $-0,54 \div -0,64$) oraz mikrotwardością (współczynnik korelacji liniowej w zakresie: $-0,25 \div -0,34$).

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wzrost prędkości poślizgu prowadził do wzrostu zużycia objętościowego tarcz poddanych badaniom tribologicznym. Spośród wszystkich próbek najniższe wartości parametru VD otrzymano w przypadku tarcz nagniatanych ślizgowo Al_{70} oraz SiC_{30} . Zużycie objętościowe tarcz było skorelowane ze średnią wartością siły tarcia a także z wartością siły tarcia otrzymaną po pokonaniu drogi tarcia równej 30 m.

Stwierdzono również występowanie szeregu zależności pomiędzy parametrami charakteryzującymi strukturę geometryczną powierzchni tarcz a zużyciem objętościowym. Silną liniową zależność zaobserwowano w przypadku parametrów charakteryzujących krzywą udziału materiałowego (Sk , Svk , Spk) a także w przypadku współczynników asymetrii oraz nachylenia powierzchni (Ssk i Sku).

Przeprowadzone badania potwierdziły korzystny wpływ procesu nagniatania ślizgowego (niezależnie od zastosowanej ceramiki) na redukcję zużycia objętościowego skojarzeń trących w porównaniu do innych popularnych obróbek wykończeniowych stosowanych w budowie maszyn.

Literatura

1. Bara M, Skoneczny W, Kaptacz S. A Tribological properties of ceramic-carbon surface layers obtained in electrolytes with a different graphite content. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2008; 4: 66-70.
2. Chomienne V, Valiorgue F, Rech J, Verdu C. Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2016; 13: 90-96.
3. Dzierwa A, Markopoulos A P. Influence of ball-burnishing process on surface topography parameters and tribological properties of hardened steel. *Machines* 2019; 7(1): 11.
4. Dzierwa A, Pawlus P, Reizer R. The effect of ceramic tribo-elements on friction and wear of smooth steel surfaces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 2019; 233(3): 456–465.
5. El-Tayeb N S M. Frictional behaviour of burnished copper surfaces under dry contact conditions. *Engineering Research Bulletin* 1994; HU Cairo: 171-184.
6. El-Tayeb N S M, Low K O, Brevern P V. Enhancement of surface quality and tribological properties using ball burnishing process. *Machining Science and Technology* 2008; 12: 234-248.
7. Fitzpatrick M E, Fry A T, Holdway P, Kandil F A, Shackleton J, Suominen L L. Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction – Issue 2. A National Measurement Good Practice Guide No. 52: National Physical Laboratory, 2005.

8. Gadelmawla E S, Koura M M, Maksoud T M A, Elewa I M, Soliman H H. Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology* 2002; 123: 133-145.
9. Ganesh B K C, Sha W, Ramanaiah N, Krishnaiah A. Effect of shot peening on sliding wear and tensile behavior of titanium implant alloys. *Materials & Design* 2014; 56: 480-486.
10. Hamadache H, Laouar L, Zeghib N E, Chaoui K. Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing. *Journal of Materials Processing Technology* 2006; 180: 130–136.
11. Hassan A M. The effects of ball and roller burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals. *Journal of Materials Processing Technology* 1997; 72: 385–391.
12. Janczewski Ł, Toboła D, Brostow W, Czechowski K, Hagg Lobland K E, Kot M, Zagórski K. Effects of ball burnishing on surface properties of low density polyethylene. *Tribology International* 2016; 93: 36-42.
13. Jedliński R. Diagnostyka w procesie wyceny wartości pojazdów samochodowych i ustaleniu przyczyn oraz następstw uszkodzeń. *Diagnostyka* 2005, 33: 65-70.
14. Jerez-Mesa R, Gomez-Gras G, Travieso-Rodriguez J A. Surface roughness assessment after different strategy patterns of ultrasonic ball burnishing. *Procedia Manufacturing* 2017; 13: 710-717.
15. Jerez-Mesa R, Travieso-Rodríguez J A, Landon Y, Dessein G, Lluma-Fuentes J, Wagner V. Comprehensive analysis of surface integrity modification of ball-end milled Ti-6Al-4V surfaces through vibration-assisted ball burnishing. *Journal of Materials Processing Technology* 2019; 267: 230-240.
16. Korzynski M, Dzierwa A, Pacana A, Cwanek J. Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its improvement with ball peening. *Surface and Coatings Technology* 2009; 204: 615–620.
17. Kovács Z F, Viharos Z J, Kodácsy J. Determination of the working gap and optimal machining parameters for magnetic assisted ball burnishing. *Measurement* 2018; 118: 172–180.
18. Low K O, Wong K J. Influence of ball burnishing on surface quality and tribological characteristics of polymers under dry sliding conditions. *Tribology International* 2011; 44: 144-153.
19. Niemczewska-Wojcik M. Wear mechanisms and surface topography of artificial hip joint components at the subsequent stages of tribological tests. *Measurement* 2017; 107: 89-98.
20. PN-EN ISO 25178-2:2012 Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.
21. PN-EN ISO 4516:2004 Powłoki metalowe i inne nieorganiczne. Badania mikrotwardości metodą Vickersa i Knoop.
22. Priyadarsini Ch, Venkata Ramana V S N, Aruna Prabha K, Swethaa S. A review on ball, roller, low plasticity burnishing process. *Materials Today: Proceedings* 2019; 18(7): 5087-5099.
23. Pu Y, Zhao Y, Zhang H, Zhao G, Meng J, Song P. Study on the three-dimensional topography of the machined surface in laser-assisted machining of Si₃N₄ ceramics under different material removal modes. *Ceramics International* 2019; In press, Available online 14 November 2019.
24. Rao D S, Suresh H H, Komaraiah M, Kempaiah U N. Investigations on the effect of ball burnishing parameters on surface hardness and wear resistance of HSLA dual-phase steels. *Materials and Manufacturing Processes* 2008; 23: 295-302.

25. Revankar G D, Shetty R, Rao S S, Gaitonde V N. Analysis of surface roughness and hardness in ball burnishing of titanium alloy. *Measurement* 2014; 58: 256-268.
26. Revankar G D, Shetty R, Rao S S, Gaitonde V N. Wear resistance enhancement of titanium alloy (Ti-6Al-4V) by ball burnishing process. *Journal of Materials Research and Technology* 2017; 6: 13-32.
27. Sadowski Ł, Czarnecki S, Hoła J. Evaluation of the height 3D roughness parameters of concrete substrate and the adhesion to epoxy resin. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2016; 67: 3-13.
28. Saldaña-Robles A, Plascencia-Mora H, Aguilera-Gómez E, Saldaña-Robles A, Marquez-Herrera A, Diosdado-De la Peña J A. Influence of ball-burnishing on roughness, hardness and corrosion resistance of AISI 1045 steel. *Surface and Coatings Technology* 2018; 339: 191-198.
29. Sedlacek M, Podgornik B, Vizintin J. Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear. *Wear* 2009; 266: 482-487.
30. Swirad S, Wdowik R. Determining the effect of ball burnishing parameters on surface roughness using the Taguchi method. *Procedia Manufacturing* 2019; 34: 287-292.
31. Swirad S, Wydrzynski D, Nieslony P, Krolczyk G M. Influence of hydrostatic burnishing strategy on the surface topography of martensitic steel. *Measurement* 2019; 138: 590-601.
32. Teimouri R, Amini S, Bagheri Bami A. Evaluation of optimized surface properties and residual stress in ultrasonic assisted ball burnishing of AA6061-T6. *Measurement* 2018; 116: 129-139.
33. Travieso-Rodríguez J A, Jerez-Mesa R, Gómez-Gras G, Llumà-Fuentes J, Casadesús-Farràs O, Madueño-Guerrero M. Hardening effect and fatigue behavior enhancement through ball burnishing on AISI 1038. *Journal of Materials Research and Technology* 2019, 8(6): 5639-5646.
34. Valiorgue F, Zmelty V, Dumas M, Chomienne V, Verdu C, Lefebvre F, Rech J. Influence of residual stress profile and surface microstructure on fatigue life of a 15-5PH. *Procedia Engineering* 2018; 213: 623-629.
35. Yilmaz H, Sadeler R. Impact wear behavior of ball burnished 316L stainless steel. *Surface and Coatings Technology* 2019; 363: 369-378.
36. Zaleski K. The effect of vibratory and rotational shot peening and wear on fatigue life of steel. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2017; 19(1): 102-107.
37. Zhang P, Liu Z. Enhancing surface integrity and corrosion resistance of laser clad Cr-Ni alloys by hard turning and low plasticity burnishing. *Applied Surface Science* 2017; 409: 169-178.
38. Żurowski W. Structural factors contributing to increased wear resistance of steel friction couples. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2012; 14(1): 19-23.
39. Żurowski W, Brzózka K, Górka B. Analysis of surface layers and wear products by Mössbauer spectral analysis. *Wear* 2013; 297(1): 958-965.
40. Żurowski W, Brzózka K, Górka B. Structure of friction products and the surface of tribological system elements. *Nukleonika* 2013; 58: 99-103.