

Beata BULIKOWSKA^{*}, Lidia GAŁDA^{*}

**WPLYW NIERÓWNOŚCI POWIERZCHNI
NA WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE
ELEMENTÓW ŚLIZGOWYCH W SKOJARZENIU
MATERIAŁOWYM SiC–42CrMo4**

**THE EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS ON THE
TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF SLIDING ELEMENTS
IN MATERIAL ASSEMBLY SiC–42CrMo4**

Słowa kluczowe:

chropowatość powierzchni, twardość, ceramika SiC

Key words:

surface roughness, hardness, SiC ceramics

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań tribologicznych węzłów ślizgowych w skojarzeniu materiałowym ceramika SiC–stal 42CrMo4. Powierzchnia stali została przygotowana w trzech wariantach wykończenia charakteryzowanych parametrem Ra. Analizie poddano także wpływ twardości materiału stalowych

^{*} Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, al. Powstania Warszawskiego 6, 35-959 Rzeszów, Polska.

próbek w zakresie 22–42 HRC na wartość współczynnika tarcia. Badania realizowano z wykorzystaniem testera T-11 z węzłem ślizgowym typu kulka–tarcza w styku skoncentrowanym. W pracy porównano otrzymane wartości współczynnika tarcia w odniesieniu do współpracujących ślizgowo elementów. Statystyczną analizę wyników badań przeprowadzono z wykorzystaniem planu statycznego zdeterminowanego kompletnego z dwoma czynnikami wejściowymi na trzech poziomach zmienności. Wykazano, że chropowatość powierzchni oraz twardość materiału w sposób istotny wpływają na charakterystyki tribologiczne pracy węzłów ślizgowych SiC-42CrMo4.

WPROWADZENIE

W ostatnich latach obserwuje się coraz większe zainteresowanie wykorzystaniem materiałów ceramicznych do produkcji elementów maszynowych pracujących w trudnych warunkach eksploatacyjnych, przykładowo kulki łożyskowe, dysze czy koła zębate. Elementy wykonane z ceramiki charakteryzują się dłuższą żywotnością oraz wpływają znacząco na wydłużenie trwałości elementów współpracujących z częściami ceramicznymi. Wyroby ceramiczne wyróżnia wysoka twardość i odporność na naprężenia normalne, lecz ograniczenie może stanowić niska odporność na kruche pęknięcia.

Łożyska toczne z ceramicznymi elementami mogą być stosowane w miejscach, gdzie panują skrajnie niskie lub wysokie temperatury oraz w środowisku korozyjnym. Zastosowanie ceramiki do wykonania standardowych wyrobów, takich jak nurnik czy zawór, powoduje nawet pięciokrotny wzrost ich trwałości [L. 1, 2]. Ze względu na doskonałe właściwości tribologiczne ceramika z powodzeniem znalazła również zastosowanie w produkcji narzędzi do nagniatania [L. 3–6].

Stan warstw wierzchnich obszarów styku wywiera decydujący wpływ na tarcie i zużycie tribologiczne trących się elementów maszyn [L. 7]. Zastąpienie stalowego elementu ceramicznym odpowiednikiem może mieć wpływ na znaczne zwiększenie odporności na zatarcie i zużycie węzłów ciernych poprzez wyeliminowanie powstawania szcziep adhezyjnych. Pozostałe czynniki, opisujące stan warstwy wierzchniej, tj. mikrostruktura materiału, twardość czy struktura geometryczna powierzchni (topografia), mogą mieć zróżnicowany wpływ na charakterystyki tribologiczne elementów ślizgowych, zależny od konkretnych rozwiązań konstrukcyjnych i występujących obciążeń.

Celem badań była ocena pracy węzłów ślizgowych z zastosowaniem elementu ceramicznego i przy zróżnicowanej chropowatości powierzchni tego elementu wyrażonej parametrem Ra w zakresie 0,04–0,24 μm i twardości materiału elementu stalowego od 22 do 42 HRC.

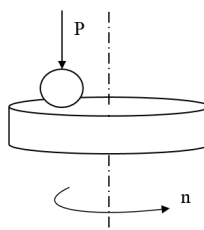
METODYKA BADAŃ

Badania tribologiczne zrealizowano z wykorzystaniem testera T-11 z węzłem typu kulka-tarcza (**Rys. 1**).

a)



b)



Rys. 1. Zdjęcie testera tribologicznego T-11 (a) oraz schemat węzła tarcia typu kulka-tarcza (b)

Fig. 1. Photo of tribological tester T-11 (a) and scheme of friction assembly pin-on-disc (b)

Próby wykonywano przy obciążeniu siłą równą 5 N. Prędkość ślizgowa wynosiła 0,08 m/s. Jako ciecz smarującą zastosowano olej maszynowy L-AN 46. Na powierzchni stalowej próbki umieszczano jedną kroplę oleju, następnie rozprowadzano olej elastycznym zbierakiem. Parametrem mierzonym była siła tarcia występująca między współpracującymi ślizgowo elementami. W celu określenia rozrzutu wyników próby powtarzano trzykrotnie. Do pomiaru oporów ruchu zastosowano czujnik tensometryczny siły o zakresie 50 N i klasie dokładności 0,1. Badania realizowano w temperaturze równej około 21°C.

Próbki stanowiły tarcze ze stali 42CrMo4 o średnicy 25,4 mm w stanie surowym o twardości 22 HRC oraz w stanie ulepszonym do twardości 32 HRC oraz 42 HRC. W celu ukształtowania określonej chropowatości powierzchni stalowe próbki poddano obróbce wykończeniowej. Po szlifowaniu powierzchni otrzymano średnie arytmetyczne odchylenie nierówności od linii średniej, tj. R_a równe około 0,24 μm . Część próbek poddano polerowaniu w celu uzyskania powierzchni o mniejszej chropowatości ($R_a = 0,14 \mu\text{m}$), natomiast ostatnią partię docierano z użyciem papieru ściernego do osiągnięcia R_a równego około 0,04 μm . Polerowanie ściernie zrealizowano z wykorzystaniem pasty polerskiej i tarcz filcowych. W procesie docierania zastosowano drobnoziarnisty papier ścierny o gradacji 800.

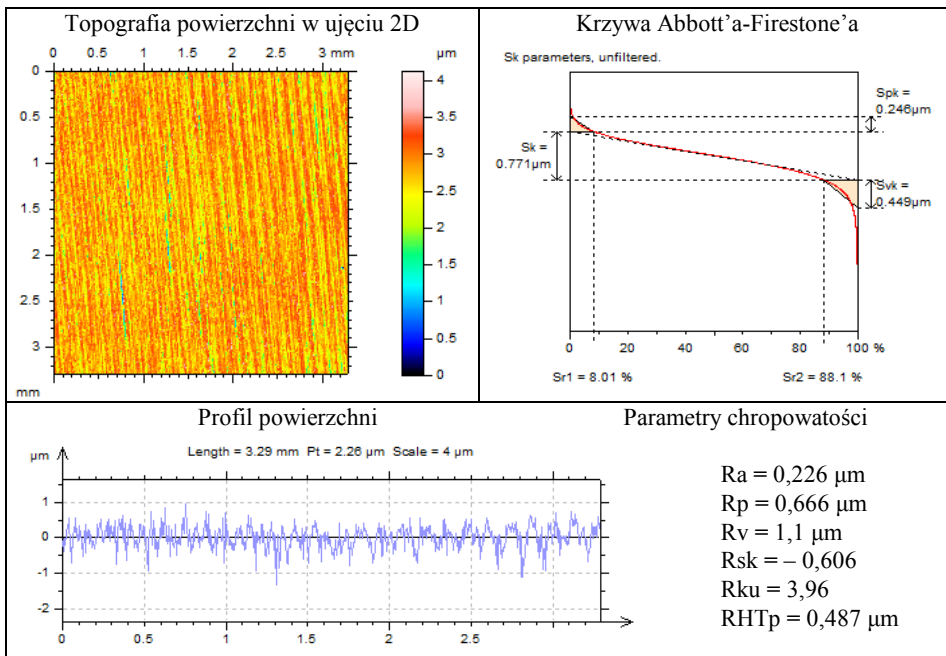
Przeciwpróbki stanowiły kulki ceramiczne SiC o średnicy 6,35 mm i twardości około 2800 HV. Chropowatość powierzchni przeciwpróbek charakteryzowana parametrem R_a wynosiła średnio 0,03 μm .

Do pomiaru i oceny struktury geometrycznej powierzchni zastosowano interferometr światła białego Talysurf CCI Lite. Powierzchnie stalowych tarcz po próbach tarcia poddano obserwacji z wykorzystaniem mikroskopu optycznego.

Badanie wpływu chropowatości powierzchni i twardości materiału przeprowadzono z wykorzystaniem planu statycznego zdeterminowanego kompletnego z dwoma czynnikami wejściowymi na trzech poziomach zmienności przy poziomie istotności α równym 0,05. Analizę statystyczną przeprowadzono z uwzględnieniem skutków interakcji między czynnikami wejściowymi. Powtarzalność warunków doświadczeń oceniono z wykorzystaniem kryterium Cochran, istotność współczynników równania regresji ustalono za pomocą testu t-Studenta, natomiast do oceny adekwatności równania zastosowano test Fishera-Snedecora.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

W wyniku realizacji określonych technologii otrzymano powierzchnie o zróżnicowanej topografii. Na **Rys. 2** przedstawiono topografię powierzchni w ujęciu 2D,

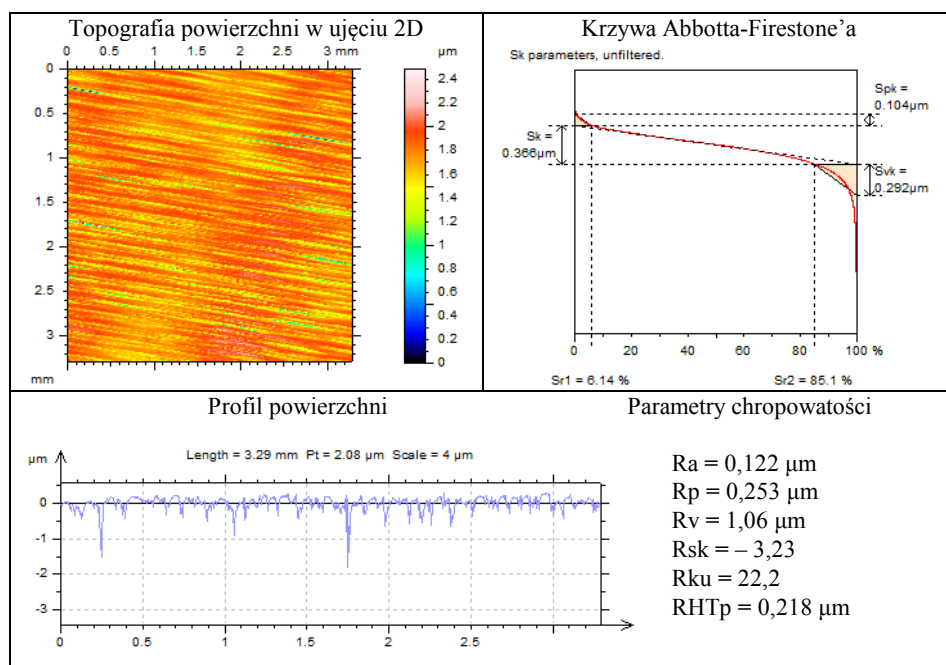


Rys. 2. Topografia powierzchni w ujęciu 2D, krzywa Abbotta-Firestone'a, przykładowy profil wraz z wybranymi parametrami chropowatości powierzchni po obróbce szlifowaniem

Fig. 2. Pseudo-color image, Abbott-Firestone curve, selected profile with the roughness parameters of surface after grinding

krzywą Abbotta-Firestone'a, przykładowy profil oraz wybrane wartości parametrów chropowatości powierzchni po obróbce szlifowaniem. Uzyskana topografia powierzchni charakteryzowała się dominującą wysokością rdzenia Sk . Wartość maksymalnej wysokości wzniesień profilu Rp stanowiła ponad 50% głębokości dolin Rv .

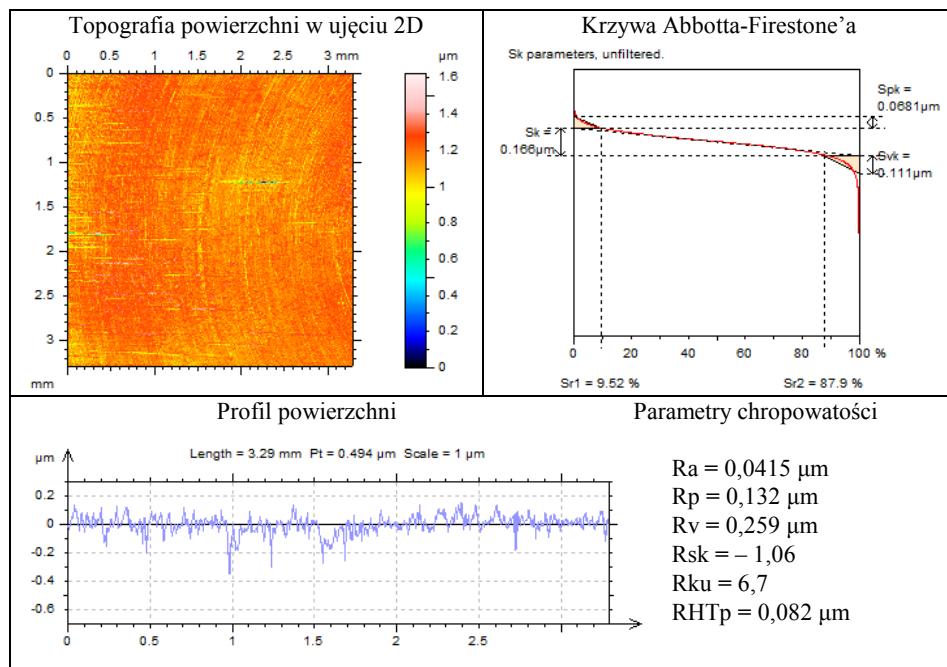
W celu uzyskania topografii powierzchni o mniejszej wysokości nierówności stalowe próbki poddano polerowaniu. Tak ukształtowane powierzchnie próbek charakteryzowała przede wszystkim mniejsza wysokość wzniesień profilu, która stanowiła około 25% wysokości wgłębień. Otrzymana skośność profilu wyrażona została również poprzez parametr asymetrii, który zmniejszył się do wartości $-3,23$. Ponaddwukrotnie zmniejszyła się wysokość obszaru nośności w porównaniu z wartością wysokości $RHTp$ powierzchni po szlifowaniu. Wybrane wartości parametrów chropowatości dla przykładowego profilu charakteryzujące daną powierzchnię, topografię powierzchni w ujęciu 2D, wybrany profil oraz krzywą udziału materiałowego po obróbce polerowaniem zostały przedstawione na **Rys. 3**.



Rys. 3. Topografia powierzchni w ujęciu 2D, krzywa Abbotta-Firestone'a, przykładowy profil wraz z wybranymi parametrami chropowatości powierzchni po obróbce polerowaniem

Fig. 3. Pseudo-color image, Abbott-Firestone curve, selected profile with the roughness parameters of surface after polishing

Po obróbce docieraniem otrzymano powierzchnie o średnim arytmetycznym odchyleniu od linii średniej, tj. R_a wynoszącym około $0,04 \mu\text{m}$. Maksymalna głębokość dolin profilu była cztery razy mniejsza w porównaniu z R_v powierzchni po szlifowaniu i polerowaniu. Dalszemu zmniejszeniu uległa wysokość obszaru nośności, wartość RHT_p była sześć razy mniejsza od tej po szlifowaniu. Na **Rys. 4** przedstawiono topografię powierzchni w ujęciu 2D, krzywą Abbotta-Firestone'a oraz wybrany profil wraz z wartościami parametrów chropowatości po obróbce docieraniem.



Rys. 4. Topografia powierzchni w ujęciu 2D, krzywa Abbotta-Firestone'a, przykładowy profil wraz z wybranymi parametrami chropowatości powierzchni po obróbce docieraniem

Fig. 4. Pseudo-color image, Abbott-Firestone curve, selected profile with the roughness parameters of surface after lapping

W rezultacie przeprowadzonych badań tribologicznych określono wartości współczynników tarcia w odniesieniu do poszczególnych wariantów wykończenia powierzchni i twardości materiału elementu stalowego w węzle ciernym (**Tab. 1**).

Największą poprawę właściwości tribologicznych zaobserwowano przy badaniu węzłów z elementem stalowym o twardości 22 HRC. Współczynnik

tarcia po zastosowaniu dodatkowej obróbki polerowania lub docierania był o około 12% mniejszy w porównaniu z wariantem po szlifowaniu.

Zmniejszenie wartości współczynnika tarcia w przypadku zastosowania dodatkowej obróbki wykończeniowej (polerowania lub docierania) powierzchni elementów stalowych o twardości 32 HRC wynosiło blisko 9% w porównaniu z wartościami uzyskanymi w badaniach węzłów z tarczą po szlifowaniu.

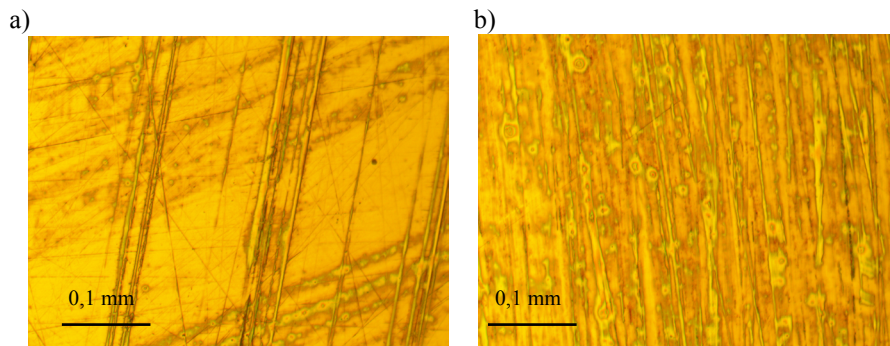
Tabela 1. Średnie wartości współczynnika tarcia dla węzłów SiC-42CrMo4 o zróżnicowanej chropowatości powierzchni i twardości stali

Table 1. The average values of friction coefficient for SiC-42CrMo4 assembly of differential surface roughness and material hardness of steel

Nr wariantu	Twardość T [HRC]	Parametr chropowatości Ra [μm]	$\bar{\mu}$	σ
1	42	0,24	0,1101	0,0003
2	42	0,14	0,1043	0,0012
3	42	0,04	0,1037	0,0029
4	32	0,24	0,1166	0,0004
5	32	0,14	0,1075	0,0016
6	32	0,04	0,1060	0,0017
7	22	0,24	0,1156	0,0018
8	22	0,14	0,1032	0,0016
9	22	0,04	0,1021	0,0025

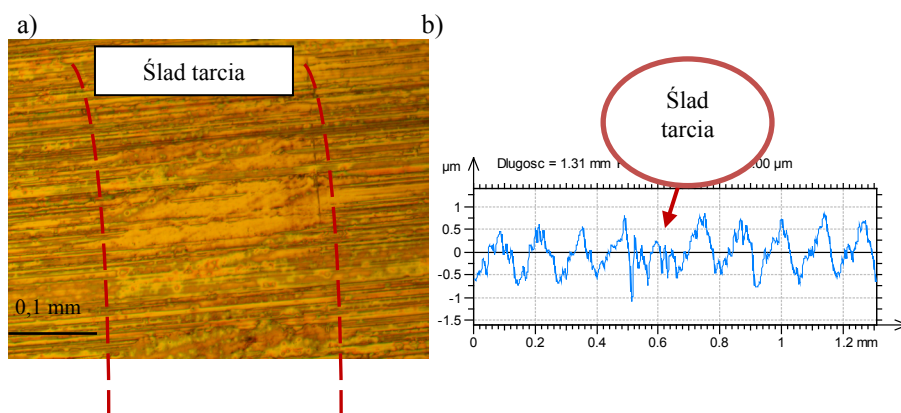
Najmniejsze efekty zastosowania dodatkowej obróbki wykończeniowej uzyskano w odniesieniu do węzłów ciernych z elementem stalowym ulepszo- nym cieplnie do twardości 42 HRC. Obniżenie wartości współczynnika tarcia wynosiło niespełna 6%. Wartość współczynnika tarcia węzłów z elementem stalowym po szlifowaniu i o twardości 42 HRC była niższa w porównaniu z wariantami o podobnej chropowatości ($R_a = 0,24 \mu\text{m}$), ale o mniejszej twardości. Elementy o większej twardości i rozdrobionej strukturze materiału po obróbce cieplnej są w stanie przetrwać obciążenia bez nadmiernego destrukcyjnego niszczenia współpracujących powierzchni i przy niższych oporach ruchu.

Mimo stosunkowo niewielkiej poprawy charakterystyk tribologicznych wyrażonych zmniejszeniem wartości współczynnika tarcia o 6–12% po zastosowaniu dodatkowej obróbki wykończeniowej na stalowych powierzchniach współpracujących z ceramicznym elementem nie obserwowano śladów zużycia (**Rys. 5**). Natomiast niezależnie od twardości materiału w zakresie 22–42 HRC na stalowych powierzchniach szlifowanych pozostały wyraźne ślady po kontakcie z ceramiczną kulką (**Rys. 6a**). W miejscach kontaktu z elementem kulistym obserwowano odkształcenia wierzchołków nierówności powierzchni po szlifowaniu (**Rys. 6b**).



Rys. 5. Zdjęcia powierzchni stali 42CrMo4 po próbach tarcia; T = 22 HRC, obróbka wykończeniowa: polerowanie Ra = 0,14 μm (a) i docieranie Ra = 0,04 μm (b)

Rys. 5. Photos of steel surface 42CrMo4 after tribological tests; T = 22 HRC, finishing operation: polishing Ra = 0.14 μm (a) and lapping Ra = 0.04 μm (b)



Rys. 6. Zdjęcie (a) oraz profil (b) powierzchni stali 42CrMo4 po próbie tarcia; T = 22 HRC, Ra = 0,24 μm, obróbka wykończeniowa: szlifowanie

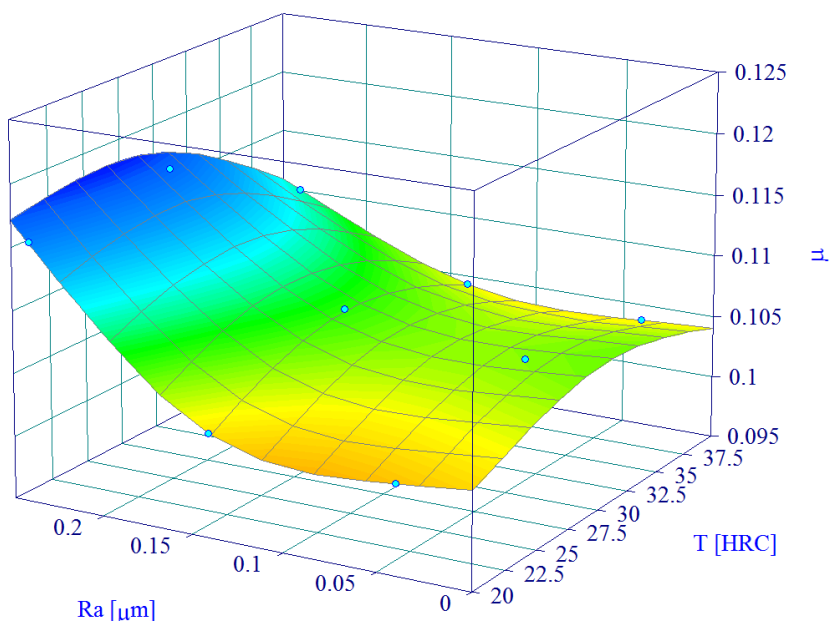
Rys. 6. Photo (a) and profile (b) of steel surface 42CrMo4 after tribological tests; T = 22 HRC, Ra = 0.24 μm, finishing operation: grinding

W oparciu o otrzymane wyniki przeprowadzono badania powtarzalności doświadczeń, istotności wpływu czynników wejściowych oraz analizę adekwatności równania regresji:

$$\mu = -0,21446 - 0,007Ra + 0,021252T - 0,0018T Ra + 0,4Ra^2 - 0,00035T^2.$$

W badanym zakresie zmienności analizowanych czynników największy wpływ na wartość współczynnika tarcia wywierała chropowatość powierzchni określona parametrem Ra. Twardość materiału była również istotna, ale wpływ na wartość współczynnika tarcia pozostawał mniejszy niż ukształtowanie po-

wierzchni. Wzajemne oddziaływanie obu czynników także miało istotne znaczenie, ale wpływ na wartość współczynnika tarcia μ był mniejszy niż czynników wejściowych rozpatrywanych osobno. Na **Rys. 7** przedstawiono zależność wartości współczynnika tarcia od odchylenia średniego profilu od linii średniej i twardości materiału.



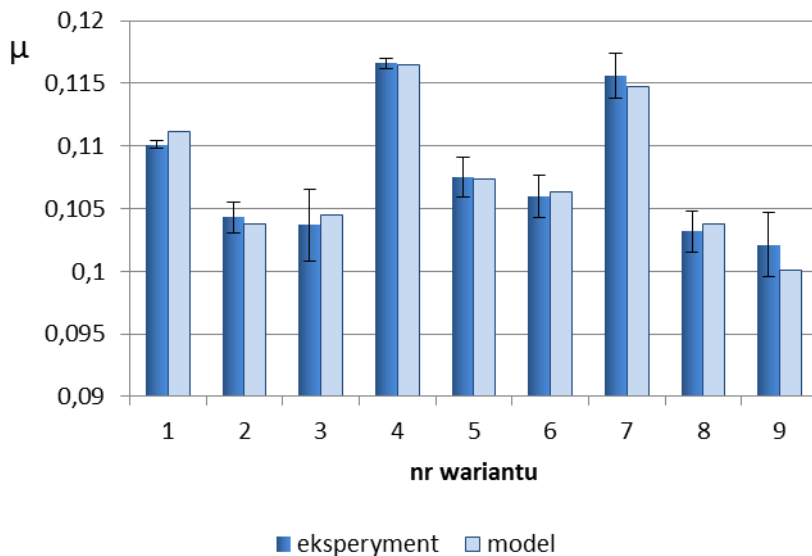
Rys. 7. Powierzchnia odpowiedzi wartości współczynnika tarcia w zależności od odchylenia średniego arytmetycznego profilu Ra i twardości materiału T stali 42CrMo4

Fig. 7. The values of friction coefficient in dependence of surface roughness Ra and material hardness T of 42CrMo4 steel

Model matematyczny zawierający zależności między czynnikami wejściowymi a parametrem wynikowym w sposób adekwatny opisuje zrealizowany eksperyment. Na **Rys. 8** przedstawiono uśrednione wyniki otrzymane w eksperymencie oraz obliczone z wykorzystaniem analizy statystycznej.

Z przedstawionego na **Rys. 8** wykresu widać, że wartości współczynnika tarcia obliczone według modelu matematycznego są bliskie wartościom otrzymanym w eksperymencie. Zmniejszenie wartości chropowatości powierzchni określonej parametrem Ra do $0,14 \mu\text{m}$ poprzez polerowanie oraz do $0,04 \mu\text{m}$ po zastosowaniu docierania skutkowało uzyskaniem mniejszych wartości współczynnika tarcia. Średnie wartości współczynnika tarcia po zastosowaniu polerowania lub docierania powierzchni stalowego elementu ciernego mieściły się w granicach odchylenia standardowego. Dalsze zmniejszanie nierówności po-

wierzchni jest nieekonomiczne, a także mogłoby wpłynąć na intensyfikację procesów zużywania.



Rys. 8. Wartości współczynników tarcia otrzymane w eksperymencie i obliczone z równania regresji

Fig. 8. The values of friction coefficient obtained in experiment and calculated from the regression function

PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych badań potwierdzono celowość stosowania materiałów ceramicznych do budowy elementów ślizgowych.

Wykazano, że istotny wpływ na charakterystyki tribologiczne węzłów ciernych SiC-42CrMo4 wywierają chropowatość powierzchni, twardość materiału i ich interakcja w analizowanym zakresie zmienności. Największe oddziaływanie na wartość współczynnika tarcia wywierała chropowatość powierzchni wyrażona parametrem Ra, którego wartość zmieniano w zakresie $0,04 \div 0,24 \mu\text{m}$. Słuszne jest więc stosowanie dodatkowej obróbki wykończeniowej powierzchni stalowych elementów maszyn współpracujących ślizgowo z ceramicznym elementem w warunkach tarcia ze smarowaniem. Obniżenie wartości amplitudowych parametrów chropowatości powierzchni spowodowało zmniejszenie wartości współczynnika tarcia oraz ograniczenie odkształceń plastycznych obszarów styku.

LITERATURA

1. Dobrzański L.: Niemetalowe materiały inżynierskie. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008.
2. www.ceromit.pl dostęp w dniu 15.05.2015.
3. Konefal K., Korzynski M., Byczkowska Z., Korzynska K.: Improved corrosion resistance of stainless steel X6CrNiMoTi17-12-2 by slide diamond burnishing. Journal of Materials Processing Technology 213, 2013, s. 1997–2004.
4. Korzynski M., Lubas J., Swirad S., Dudek K.: Surface layer characteristics due to slide diamond burnishing with a cylindrical-ended tool. Journal of Materials Processing Technology 211, 2011, s. 84–94.
5. Polowski W., Stós J., Bednarski P., Czechowski K., Wszolek J.: Nagniatanie ślizgowe narzędziami diamentowymi. Mechanik nr 12, 2010, s. 965–967.
6. Gałda L.: Zastosowanie ceramiki SiC do nagniatania ślizgowego stali. Mechanik nr 11, 2014.
7. Hebda M.: Procesy tarcia, smarowania i zużycia maszyn. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Warszawa – Radom 2007.

Summary

The results of the investigations of sliding pairs of SiC ceramics and 42CrMo4 steel are presented in the article. The steel surface was prepared with three different technological methods of finishing. The surface roughness was defined by the Ra parameter. The effect of the material hardness of steel in the range of 22-42 HRC on the friction coefficient values was also examined. The examinations were realized with utilization of the T-11 tribotester with the sliding pair of the ball-on-disc type. The obtained friction coefficient values were compared in reference to co-operating elements of differential roughness and hardness. Tests were realized according to statistical 3-level completed plan PS/DC 3². It was demonstrated that both the surface roughness and the material hardness significantly influenced the tribological characteristics of the sliding assemblies SiC-42CrMo4.