

# The influence of surface topography on selected tribological properties of hardened 100Cr6 steel after turning

Wpływ topografii powierzchni na wybrane właściwości tribologiczne utwardzonej stali 100Cr6 po toczeniu

JANUSZ KALISZ  
DANIEL TOBOŁA \*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.11.95>

Results of surface topography analysis and selected tribological properties of samples of 100Cr6 bearing steel after turning with variable feed are presented. The hardness of samples after heat treatment carried out in a vacuum furnace (including quenching and double tempering) was  $60 \pm 1$  HRC. The influence of turning feed on surface topography after machining as well as selected tribological properties were determined. Depending on the surface topography of samples, differences between values of friction coefficients and wear rates were about 25%. Moreover, along with the surface roughness changing, different nature of wear was found.

**KEYWORDS:** surface roughness, bearing steel, turning, coefficient of friction, wear

Przedstawiono wyniki analizy topografii powierzchni oraz wybranych właściwości tribologicznych próbek ze stali łożyskowej 100Cr6 po toczeniu ze zmiennym posuwem. Twardość próbek po obróbce cieplnej, przeprowadzonej w piecu próżniowym (obejmującej hartowanie i dwukrotne odpuszczanie), wynosiła  $60 \pm 1$  HRC. Analizowano wybrane parametry chropowatości powierzchni. Określono wpływ posuwu toczenia na topografię powierzchni po obróbce, a także na wybrane właściwości tribologiczne. Różnice między wartościami współczynnika tarcia i zużycia wyniosły ok. 25% w zależności od topografii powierzchni próbek. Ponadto wraz ze zmianą chropowatości powierzchni stwierdzono różny charakter zużycia.

**SŁOWA KLUCZOWE:** chropowatość powierzchni, stal łożyskowa, toczenie, współczynnik tarcia, zużycie

## Wprowadzenie

Warstwa wierzchnia objętościowo stanowi zaledwie kilka procent całego elementu, a jednak jej cechy stereometryczne i fizykochemiczne decydują o intensywności procesu zużycia [1]. Chropowatość jest jednym ze sposobów opisywania jakości wykończenia powierzchni obrabianego elementu [2]. W celu scharakteryzowania i klasyfikacji różnych powierzchni parametry chropowatości zostały opracowane i znormalizowane. Najczęściej

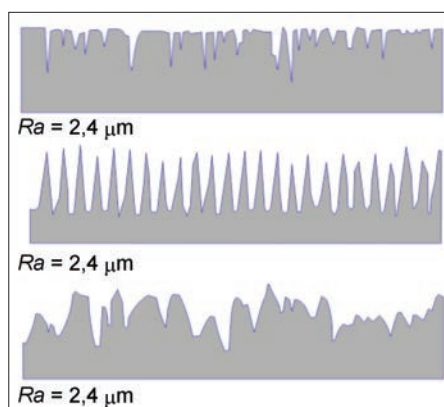
stosowanym parametrem chropowatości do oceny jakości powierzchni jest  $R_a$  – średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości. Do oceny powierzchni styku wykorzystuje się krzywą udziału materiałowego (krzywą Abbota-Firestone'a), która przedstawia udział materiałowu profilu jako funkcję wysokości cięcia. Powierzchnia może mieć podobne lub nawet identyczne wartości  $R_a$  (co przedstawiono na rys. 1), natomiast zdecydowanie może się różnić np. udziałem materiałowym profilu chropowatości [3].

Przedstawiona w monografii [5] definicja walorów użytkowych struktury geometrycznej powierzchni (SGP) wskazuje, że są one ściśle związane z ukształtowaniem geometrycznym powierzchni oraz parametrami geometrycznymi zależnymi od zastosowanej techniki kształtowania i tworzą swoisty łańcuch: walory użytkowe – parametry geometryczne – technika kształtowania – ukształtowanie geometryczne.

Obecnie w rozwoju techniki bardzo ważną rolę odgrywają czynniki ekologiczne i ekonomiczne. Biorąc je pod uwagę, możliwe jest zwiększenie sprawności systemów mechanicznych i zmniejszenie strat tarcia przez zastosowanie nowych technologii powierzchniowych oraz narzędzi z nowych, zaawansowanych materiałów.

Fig. 1. Examples of the surface roughness profiles with the same value of the  $R_a$  parameter, but with different distribution of profile ordinates (based on [4])

Rys. 1. Przykładowe profile chropowatości powierzchni o tej samej wartości parametru  $R_a$ , ale o różnym rozkładzie rzędnych profilu (na podstawie [4])



\* Dr inż. Janusz Kalisz, [janusz.kalisz@ios.krakow.pl](mailto:janusz.kalisz@ios.krakow.pl), <https://orcid.org/0000-0001-8348-6437> – Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków, Polska  
Dr inż. Daniel Toboła, [daniel.tobola@ios.krakow.pl](mailto:daniel.tobola@ios.krakow.pl), <https://orcid.org/0000-0001-7966-240X> – Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków, Polska

Konieczność poprawy efektywności i zmniejszenia strat tarcia występuje np. w łożyskach układów napędowych urządzeń wykorzystywanych w transporcie. Poprawa efektywności i wzrost trwałości części maszyn w przemyśle motoryzacyjnym przekłada się na niższe zużycie paliwa i zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych. Można to uzyskać przez wykorzystanie wiedzy o właściwościach tribologicznych powierzchni stykowych. Niestety, nie zawsze wykorzystuje się w praktyce wyniki badań wpływu topografii powierzchni na właściwości tribologiczne powierzchni stykowych. Wraz z rozwojem różnych sposobów wytwarzania elementów mechanicznych możliwe jest uzyskanie powierzchni o zróżnicowanej strukturze geometrycznej, co odzwierciedlają różne właściwości tribologiczne. Chropowatość powierzchni ma istotny wpływ m.in. na: tarcie w warunkach suchych oraz smarownych, tworzenie się warstewki smaru czy zdolność przenoszenia obciążeń [6–10].

Uwzględniając niewielki wpływ prędkości skrawania na chropowatość powierzchni [11], celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu topografii powierzchni uzyskanej po toczeniu ze zmiennym posuwem (w zakresie 0,05÷0,35 mm/obr) na właściwości tribologiczne próbek ze stali łożyskowej 100Cr6. Analizowano zależność pomiędzy wybranymi parametrami SGP a odpornością na zużycie ukształtowanej warstwy wierzchniej.

## Metodyka badań

Przebadano powszechnie stosowaną w przemyśle stal łożyskową 100Cr6. Skład chemiczny tej stali zamieszczono w tabl. I. Wstępna obróbka mechaniczna obejmowała cięcie wałków na próbki o wymiarach przedstawionych na rys. 2. Następnie przeprowadzono obróbkę cieplną, która składała się z procesu hartowania i dwukrotnego odpuszczania. Uzyskano twardość próbek rzędu  $60 \pm 1$  HRC.

Na kolejnym etapie badań przeprowadzono toczenie powierzchni czołowych próbek płytkami z polikrystalicznego regularnego azotku boru (PCBN). Zastosowane parametry toczenia zamieszczono w tabl. II.

TABLE I. Chemical composition of 100Cr6 steel (AISI 52100)

TABLICA I. Skład chemiczny stali 100Cr6 (AISI 52100)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
1,01	0,34	0,21	0,010	0,009	1,41	0,10	0,12

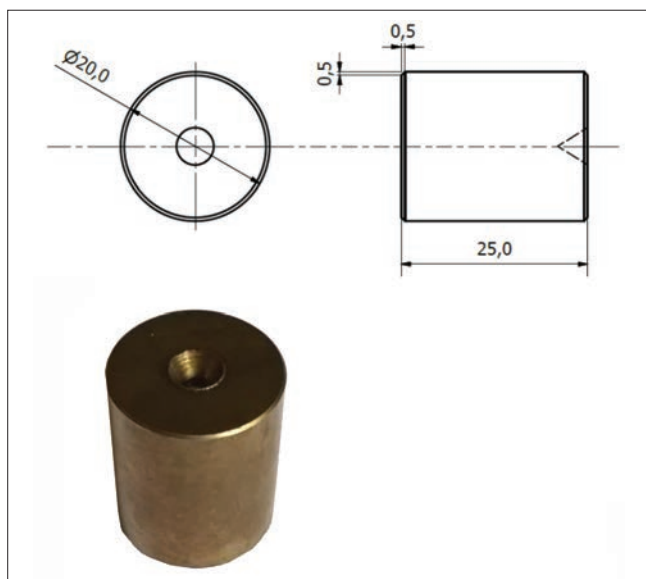


Fig. 2. Dimensions of tested samples  
Rys. 2. Wymiary badanych próbek

Do badań odporności na zużycie ściernie wykorzystano metodę ball-on-disc oraz uniwersalny tester UMT-2MT firmy CETR. Metoda pozwala na badanie właściwości tribologicznych, tj. współczynnika tarcia oraz współczynnika zużycia materiałów współpracujących ze sobą w pokojowej lub podwyższonej temperaturze. Jako przeciwpróbkę zastosowano polerowaną kulkę z ceramiki  $Al_2O_3$  o średnicy 6 mm. W każdym teście próbka współpracowała z nową powierzchnią kulki. Kulkę każdorazowo myto w acetonie i po wysuszeniu umieszczano w uchwycie mocującym. Powierzchnie próbek myto w alkoholu i pozostawiano do całkowitego wysuszenia. W prowadzonych badaniach zastosowano następujące parametry: obciążenie  $F_n = 2$  N, drogę tarcia  $L = 1200$  m, liniową prędkość tarcia  $v = 6000$  mm/min, liczbę cykli  $N = 47746$ , promień toru tarcia  $r = 4$  mm, czas testu  $t = 200$  min. Testy wykonano w temperaturze otoczenia  $22 \pm 2^\circ C$  i w warunkach wilgotności względnej 60%.

TABLE II. Turning parameters of face surfaces of 100Cr6 steel samples

TABLICA II. Parametry toczenia powierzchni czołowych próbek ze stali 100Cr6

Rodzaj płytki	Prędkość skrawania $v_c$ [m/min]	Posuw $f$ [mm/obr]	Głębokość skrawania $a_p$ [mm]
NP-SNGA120412GS2 MB730	75	0,05÷0,35	0,2

Pomiary topografii powierzchni wraz z analizą śladów wytarcia wykonano z zastosowaniem przyrządu stykowego TOPO 01P (konstrukcji Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania). Profilometr wyposażono w głowicę pomiarową o zakresie 1 mm, z końcówką diamentową o promieniu 2  $\mu m$  i kącie stożka 60°. Zmierzono obszary  $4 \times 3,4$  mm, z gęstościami skanowania: 0,5  $\mu m$  w osi pomiaru oraz 10  $\mu m$  w kierunku prostopadłym do pomiaru. Stan geometryczny warstwy wierzchniej określono przez pomiar parametrów chropowatości powierzchni w układzie 3D według norm ISO 25178 i EUR 1517 EN. Podczas obróbki zmierzonych danych zastosowano filtrację Gaussa zgodną z ISO 16610-21. Analizowano zmiany jakościowe badanych powierzchni związane z wykresami stereometrycznymi oraz wykresami udziału materiałowego z oznaczonym rdzeniem chropowatości. Wykonano analizę statystyczną wybranych wysokościowych parametrów chropowatości oraz parametrów rdzenia chropowatości.

Na podstawie zmierzonego pola powierzchni przekroju wytarcia obliczono objętość usuniętego materiału jako iloczyn pola powierzchni przekroju oraz długości obwodu wytarcia. Schemat opisujący metodę pomiaru oraz pomiar objętości wytartego materiału przedstawiono w pracy [12].

## Wyniki badań

Wyniki pomiarów wybranych parametrów chropowatości w układzie 3D na powierzchniach czołowych próbek zamieszczono w tabl. III. Biorąc pod uwagę zmienny posuw toczenia, uzyskane wyniki podzielono na trzy grupy:

- I:  $f \leq 0,10$  mm/obr,
- II:  $f > 0,10 \leq 0,20$  mm/obr,
- III:  $f > 0,20 \leq 0,35$  mm/obr.

Analiza wyników badań wykazała, że najmniejsze wartości wysokościowych parametrów chropowatości uzyskano dla próbek toczonej z posuwem  $f < 0,10$  mm/obr, przy czym wartość tych parametrów proporcjonalnie rosła ze zwiększającym się posuwem.

TABLE III. Average values of selected roughness parameters after turning of 100Cr6 steel with constant speed and depth of cut  
 TABLICA III. Średnie wartości wybranych parametrów chropowatości po toczeniu stali 100Cr6 ze stałą prędkością i głębokością skrawania

Grupa	Posuw $f$ [mm/obr]	$S_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$S_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$S_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$S_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$S_{ku}$	$S_k$ [ $\mu\text{m}$ ]	$S_{pk}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$S_{vk}$ [ $\mu\text{m}$ ]
I	0,05	0,07	0,29	0,33	0,62	3,2	0,19	0,06	0,10
	0,08	0,17	0,50	0,55	1,05	1,9	0,55	0,07	0,14
	0,10	0,22	0,78	0,74	1,53	2,2	0,70	0,19	0,14
II	0,15	0,52	1,70	1,02	2,71	2,2	1,09	1,07	0,10
	0,18	0,78	2,18	1,31	3,49	2,0	1,45	1,68	0,08
	0,20	0,96	2,74	1,56	4,30	2,1	1,68	2,01	0,07
III	0,25	1,52	4,11	2,29	6,40	2,1	2,41	3,34	0,07
	0,30	2,19	6,08	4,40	10,47	2,1	3,78	4,60	0,84
	0,35	3,01	8,01	5,67	13,68	2,0	5,29	6,27	0,63

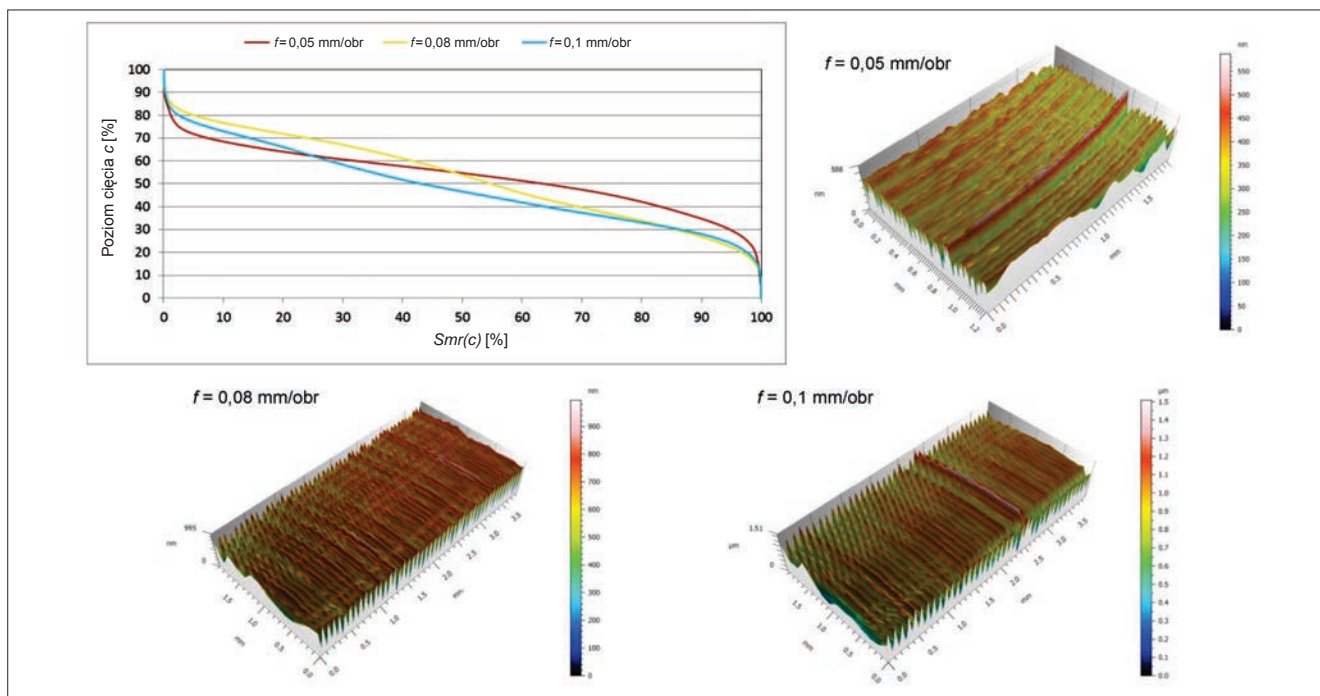


Fig. 3. Comparison of material ratio of the profile and surface topography after turning with feed:  $f = 0.05$  mm/rev,  $f = 0.08$  mm/rev and  $f = 0.1$  mm/rev  
 Rys. 3. Porównanie krzywych udziału materiałowego oraz topografii powierzchni po toczeniu z posuwem:  $f = 0.05$  mm/obr,  $f = 0.08$  mm/obr oraz  $f = 0.1$  mm/obr

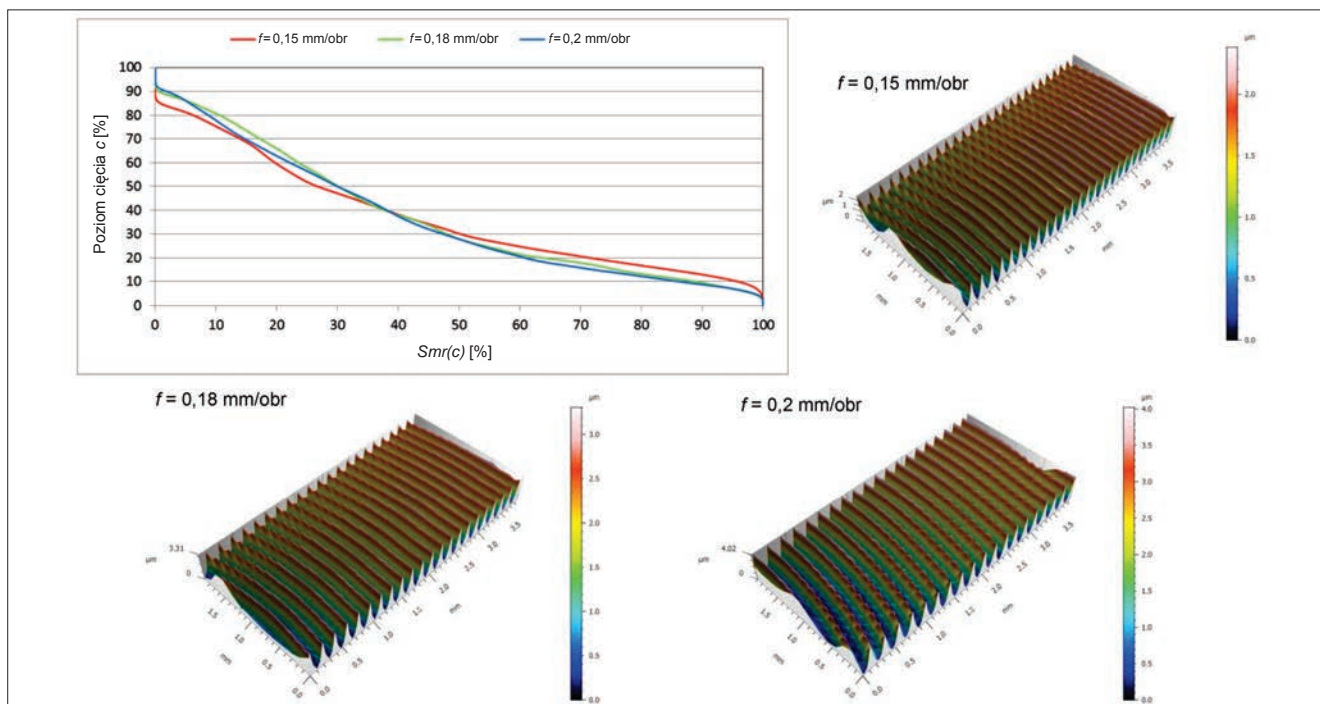


Fig. 4. Comparison of material ratio of the profile and surface topography after turning with feed:  $f = 0.15$  mm/rev,  $f = 0.18$  mm/rev and  $f = 0.2$  mm/rev  
 Rys. 4. Porównanie krzywych udziału materiałowego oraz topografii powierzchni po toczeniu z posuwem:  $f = 0.15$  mm/obr,  $f = 0.18$  mm/obr oraz  $f = 0.2$  mm/obr

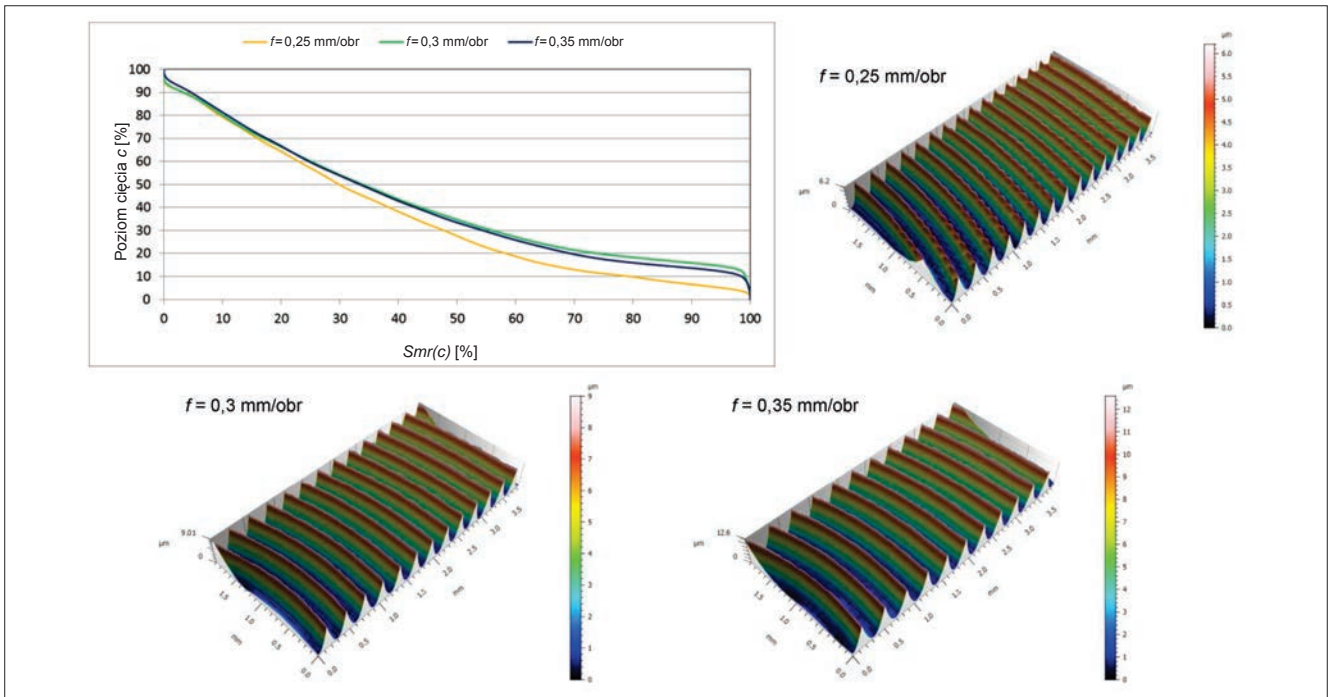
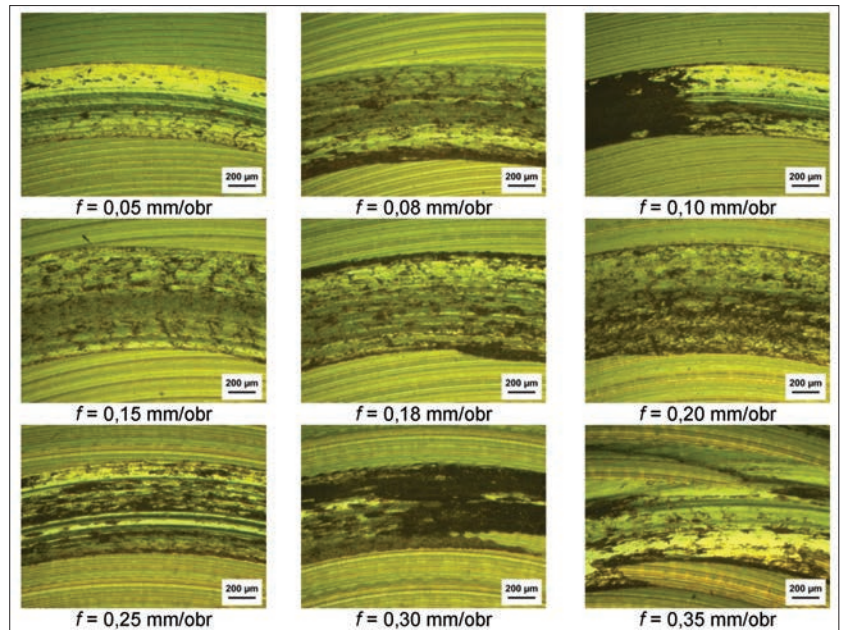


Fig. 5. Comparison of material ratio of the profile and surface topography after turning with feed:  $f = 0.25$  mm/rev,  $f = 0.3$  mm/rev and  $f = 0.35$  mm/rev  
Rys. 5. Porównanie krzywych udziału materiałowego oraz topografii powierzchni po toczeniu z posuwem:  $f = 0,25$  mm/obr,  $f = 0,3$  mm/obr oraz  $f = 0,35$  mm/obr

Fig. 6. Microstructure of wear tracks after the ball-on-disc tests for the surface of samples made of 100Cr6 steel after turning with constant parameters  $v_c = 75$  m/min and  $a_p = 0.2$  mm and variable feed  
Rys. 6. Mikrostruktura śladów wytarcia po próbie ball-on-disc dla powierzchni próbek wykonanych ze stali 100Cr6 po toczeniu ze stałymi parametrami  $v_c = 75$  m/min i  $a_p = 0,2$  mm oraz ze zmiennym posuwem



Właściwości nośne powierzchni oceniano za pomocą rozkładu parametrów przestrzennych rdzenia chropowatości: zredukowanej wysokości wzniesień  $Spk$ , zredukowanej wysokości rdzenia  $Sk$  i zredukowanej głębokości wgłębień  $Svk$ . W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, że wraz ze zmniejszaniem się wartości parametru  $Spk$  można przewidywać w eksploatacji mniejszy naddatek na docieranie. Świadczy to także o lepszych właściwościach tribologicznych powierzchni. Najmniejsze wartości parametru  $Spk$  uzyskano dla posuwu  $f < 0,1$  mm/obr.

Zgodnie z danymi literaturowymi [13] większa głębokość wgłębień  $Svk$  niż wzniesień  $Spk$  przyczynia się do poprawy retencji i zwiększenia zdolności gromadzenia płynu w pustkach wgłębień w strefie poniżej rdzenia.

Zmierzone niskie wartości parametrów  $Sk$ ,  $Spk$  i  $Svk$  po toczeniu z posuwem  $f < 0,1$  mm/obr świadczą o uzyskaniu korzystnego rozkładu udziału materiałowego

profilu chropowatości i dobrych właściwościach nośnych powierzchni. Współczynnik nachylenia powierzchni (kurtoza)  $Sku$  informuje o rozkładzie nierówności na analizowanych powierzchniach. Wartość parametru  $Sku = 3$  wskazuje na równomierny rozkład nierówności, w tym defektów, na powierzchni. Najkorzystniejszy rozkład nierówności na powierzchni uzyskano dla posuwu  $f = 0,05$  mm/obr.

Mikrostruktury śladów wytarcia po próbie ball-on-disc przedstawiono na rys. 6. Pokazują one odmienny charakter zużycia poszczególnych powierzchni uzyskanych po toczeniu z różnym posuwem. Przyczyną takiego zjawiska jest zmieniający się kontakt pomiędzy powierzchnią próbki a przeciwpróbką. Natomiast mechanizm, którym można tłumaczyć rezultaty wytarcia, jest ścinanie lub wykruszanie się wierzchołków nierówności powierzchni pod wpływem działania siły obciążającej próbkę [14].

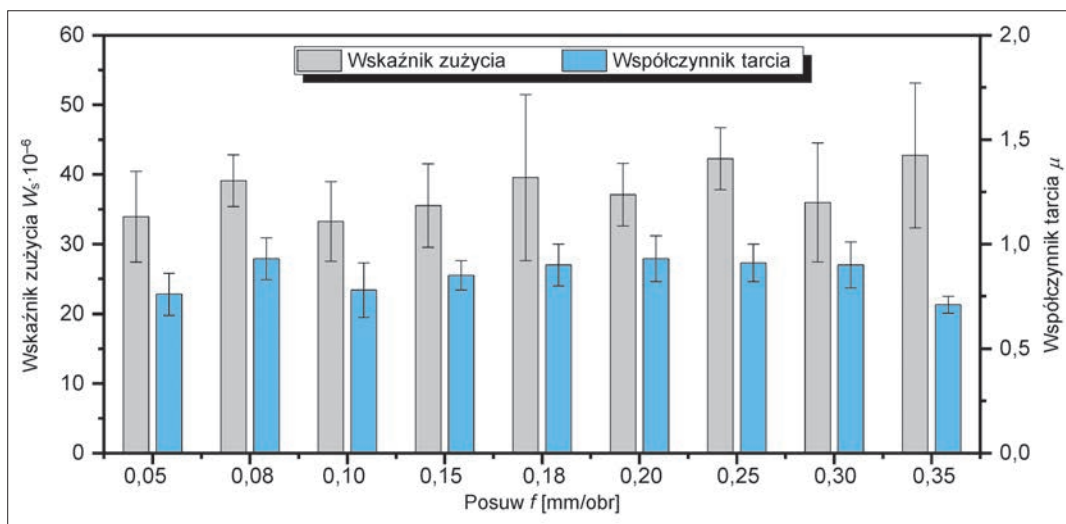


Fig. 7. Wear rates and coefficients of friction after the ball-on-disc test for 100Cr6 steel samples turned with constant parameters  $v_c = 75$  m/min and  $a_p = 0.2$  mm and variable feed Rys. 7. Wskaźniki zużycia i współczynnika tarcia po próbie ball-on-disc dla powierzchni próbek ze stali 100Cr6, toczonej ze stałymi parametrami  $v_c = 75$  m/min i  $a_p = 0,2$  mm oraz ze zmiennym posuwem

Ponadto należy zaznaczyć, że istotne znaczenie dla przebiegu zużycia pary tribologicznej może mieć zjawisko przenoszenia materiału z powierzchni o mniejszej twardości na powierzchnię materiału o większej twardości. Dochodzi wówczas do tarcia ślizgowego pomiędzy tymi materiałami, czemu może towarzyszyć silna adhezja objawiająca się w postaci matowych śladów zużycia na powierzchni próbki.

Wartości wskaźników zużycia oraz współczynników tarcia wyznaczone po testach tribologicznych przedstawiono na rys. 7. Analiza wyników badań wykazała, że różnice między odpornością na zużycie poszczególnych powierzchni ukształtowanych w wyniku toczenia z różnym posuwem wyniosły ok. 25%, a średnie wartości współczynników tarcia były w zakresie  $0,71 \div 0,93$ . Badania potwierdziły też, że zmieniający się kontakt dwóch ciał (przeciwpróbki z powierzchnią próbki o różnej SGP) wpływa na zmianę właściwości tribologicznych warstwy wierzchniej stali 100Cr6.

Zmiana posuwu toczenia powoduje skrócenie lub wydłużenie czasu obróbki. W niektórych mniej wymagających zastosowaniach, gdzie chropowatość powierzchni nie jest kluczowym czynnikiem, możliwe jest nawet dwukrotne zwiększenie posuwu (np. z 0,15 mm/obr do 0,30 mm/obr), co przynosi oszczędność czasu przy zachowaniu zbliżonych właściwości tribologicznych powierzchni.

Badania prowadzone w Instytucie świadczą o tym, że poza powszechnie stosowanymi mechanicznymi procesami obróbki powierzchniowej (np. toczeniem w stanie utwardzonym) ogromne korzyści z perspektywy właściwości tribologicznych przynoszą obróbki sekwencyjne (np. łączenie procesów mechanicznych z ciepłno-chemicznymi). Stwierdzony efekt synergii dla wybranych stali narzędziowych po zastosowaniu sekwencyjnych procesów modyfikacji ich warstwy wierzchniej przedstawiono we wcześniejszych pracach [12, 15, 16].

## Podsumowanie

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań stwierdzono wpływ posuwu toczenia na wybrane właściwości tribologiczne próbek wykonanych ze stali 100Cr6. Różnice pomiędzy wartościami współczynnika zużycia analizowanych powierzchni wyniosły ok. 25% – obserwowano przy tym zmieniający się charakter zużycia. Wykazano, że w zależności od chropowatości obrobionej powierzchni występuje zmiana współczynnika tarcia, którego średnie wartości w warunkach przeprowadzonych badań mieściły się w zakresie  $0,71 \div 0,93$ .

## Badania sfinansowano w ramach działalności statutowej Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania (DS.16-1.1).

## LITERATURA

- [1] Matuszewski M. „Kierunkowość struktury geometrycznej powierzchni w transformacji warstwy wierzchniej”. Rozprawa doktorska. Bydgoszcz, 2013.
- [2] Sahin M., Cetinarslan C.S., Akata H.E. “Effect of surface roughness on friction coefficients during upsetting processes for different materials”. *Materials and Design*. 28 (2007): 633–640.
- [3] Adamczak S. „Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2008.
- [4] Krzos J. „Struktura geometryczna powierzchni”. *Obróbka Metalu*. 1 (2012): 56–65.
- [5] Oczko K.E., Liubimov V. „Struktura geometryczna powierzchni. Podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowanych”. Rzeszów: Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, 2003.
- [6] Kalisz J. „Właściwości tribologiczne warstwy wierzchniej po obróbkach wykończeniowych stopu aluminium”. *Mechanik*. 7 (2018): 492–495.
- [7] Mathia T.G., Pawlus P., Wiecezowski M. “Recent trends in surface metrology”. *Wear*. 271 (2011): 494–508.
- [8] Sedlaček M., Podgornik B., Vižintin J. “Correlation between standard roughness parameters skewness and kurtosis and tribological behaviour of contact surfaces”. *Tribology International*. 48 (2012): 102–112.
- [9] Sedlaček M., Podgornik B., Vižintin J. “Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear”. *Wear*. 266 (2009): 482–487.
- [10] Svahn F., Rudolphi A.K., Wallén E. “The influence of surface roughness on friction and wear of machine element coatings”. *Wear*. 254 (2003): 1092–1098.
- [11] Zagórski I., Kulisz M., Warda T. „Wpływ parametrów technologicznych na chropowatość powierzchni po toczeniu oraz predykcja chropowatości z użyciem sztucznych sieci neuronowych”. *Mechanik*. 10 (2018): 898–900.
- [12] Tobała D., Brostow W., Czechowski K., Rusek P. “Improvement of wear resistance of some cold working tool steels”. *Wear*. 382–383 (2017): 29–39.
- [13] Grzesik W., Żak K. “Comparison of surface textures produced by finish cutting, abrasive and burnishing operations in terms of their functional properties”. *Journal of Machine Engineering*. 13, 2 (2013): 46–58.
- [14] Dobrzański L.A. „Kształtowanie struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich i biomedycznych”. Gliwice: International OCSCO WORD PRESS, 2009.
- [15] Tobała D., Brostow W., Czechowski K., Rusek P., Wronska I. “Structure and properties of burnished and nitride AISI D2 tool steel”. *Materials Science – Medžiagotyra*. 21 (2015): 511–516.
- [16] Tobała D. “Impact of mechanical processes as a pre-sulphonitriding treatment on tribology properties of selected P/M tool steels”. *Materials*. 12 (2019): 3431.