

Maciej Jan KUPCZYK¹

Jędrzej KOMOLKA²

Mariusz JENEK³

BADANIA PORÓWNAWCZE WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI OSTRZY SKRAWAJĄCYCH Z KUTYCH, WALCOWANYCH I SPIEKANYCH STALI SZYBKOTNĄCYCH

W artykule w celu wyjaśnienia zróżnicowanych właściwości ostrzy skrawających z konwencjonalnej i spiekanej stali szybko tnącej podczas skrawania stali 40HM-T bez oraz w obecności płynu chłodząco-smarującego przy różnych wartościach prędkości skrawania, przeprowadzono badania weryfikacyjne tych ostrzy dotyczące m.in. ich składu chemicznego, twardości, struktury, objętości olejowej powierzchni oraz współczynnika tarcia. Na końcu artykułu zamieszczono zalecenia co do zakresu stosowalności badanych materiałów narzędziowych.

Słowa kluczowe: konwencjonalne i spiekane stale szybko tnące, trwałość, współczynnik tarcia, objętość olejowa powierzchni

1. Wprowadzenie

Do materiałów narzędziowych, które wciąż od wielu lat znajdują szerokie zastosowanie podczas wytwarzania narzędzi skrawających pracujących przy umiarkowanych prędkościach skrawania, należy zaliczyć konwencjonalne stale szybko tnące. Podstawową zaletą konwencjonalnych stali szybko tnących jest ich znaczna wytrzymałość na skręcanie i zginanie w porównaniu z innymi materiałami narzędziowymi [8, 9]. Nie bez znaczenia jest stosunkowo niski koszt ich wytworzenia. W celu poprawy właściwości eksploatacyjnych zaczęto stopniowo zastępować konwencjonalne stale szybko tnące stalami otrzymywanymi w procesach metalurgii proszków. Przy zastosowaniu technologii spiekania w miejsce klasycznej metody hutniczej kierowano się tym, że metalurgia proszków daje większą swobodę w doborze składu chemicznego wyrobu, w który można praktycznie dowolnie ingerować, łącząc składniki nierozpuszczające się wzajemnie,

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Maciej Jan Kupczyk, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel.: +48 61 8665 27 27, e-mail: maciej.kupczyk@put.poznan.pl

² Jędrzej Komolka, Politechnika Poznańska, e-mail: jedrzej.komolka@gmail.com

³ Mariusz Jenek, Uniwersytet Zielonogórski, e-mail: M.Jenek@ibem.uz.zgora.pl

ze skrajnie różnymi temperaturami topnienia, będące materiałami o różnych wiązaniach chemicznych [1-5, 10-12]. Na właściwości ostrzy ze stali szybko tnących nie wpływa tylko bardziej lub mniej równomierne rozłożenie węglików w ich strukturze, na co często zwracano uwagę w literaturze. Ze wstępnych badań własnych wynika jednak, że w znacznym stopniu odmienna morfologia powierzchni wpływa na zróżnicowane właściwości tribologiczne i w związku z tym ma również (jeżeli nie bardziej) znaczący wpływ na właściwości eksploatacyjne ostrzy skrawających. Jest to istotne z punktu widzenia określenia uzasadnionego zakresu stosowalności obu odmian stali szybko tnących.

2. Warunki badań doświadczalnych

Biorąc pod uwagę powszechność zastosowania stali SW7M, do wykonania ostrzy skrawających zastosowano dwa rodzaje stali szybko tnących o podobnym składzie chemicznym:

- konwencjonalną stal szybko tnącą HS6-5-2 w postaci kutej i walcowanej,
- spiekaną stal szybko tnącą PM6-5-2.

W tabeli 1 przedstawiono orientacyjny skład chemiczny stali konwencjonalnej i spiekanej.

Tabela 1. Orientacyjny skład chemiczny konwencjonalnej (HS6-5-2) i spiekanej (PM6-5-2) stali według obowiązujących norm

Table 1. Approximate chemical composition of the conventional (HS6-5-2) and sintered (PM6-5-2) steels according to obligatory standards

Wyszczególnienie	Skład chemiczny [%]					
	C	W	Mo	V	Cr	Mn
Stal konwencjonalna	0,8-0,84	5,9-6,7	4,7-5,2	1,7-2,0	4,2	0,4
Stal spiekana	1,0	6,0	5,0	2,0	4,5	0,3

Do celów badawczych płytki skrawające z konwencjonalnej stali szybko tnącej wykonano z wyrobów hutniczych w postaci kęsów, natomiast płytki skrawające ze spiekanej stali szybko tnącej otrzymano z półfabrykatu handlowego w postaci płaskownika. Oba rodzaje stali użytych do badań były dostarczone w stanie zmięczonym. Kęsy z konwencjonalnej stali szybko tnącej i płaskowniki ze spiekanej stali szybko tnącej szlifowano do określonej grubości na szlifierce do płaszczyzn. Następnie z tak przygotowanych półfabrykatów wycięto płytki skrawające za pomocą elektrodrążarki drutowej firmy Agiecut model Classic 2. Użytkano w ten sposób płytki skrawające typu SNUN o kształcie prostopadłościennej, z kątem wierzchołkowym 90° i wymiarach: $l = 9,525 \pm 0,08$ mm oraz $m = 1,644 \pm 0,13$ mm. Płytki o tej geometrii są przeznaczone do obróbki stali do ulepszania cieplnego, stali nierdzewnych, stopów żarowytrzymałych i miękkich stali o niskiej zawartości węgla. Płytki po wycięciu szlifowano wykańczająco,

a później polerowano. Starano się, aby uzyskać podobną chropowatość powierzchni płytek z konwencjonalnej i spiekanej stali szybko tnącej, wynoszącą średnio $Ra = 0,1 \mu\text{m}$, w celu dokonania właściwego późniejszego wnioskowania. Po procesie polerowania płytki skrawające odtłuszczono.

Zakładane właściwości stali HS6-5-2 i PM6-5-2 uzyskano po obróbce cieplnej polegającej na hartowaniu i odpuszczaniu. W celu uzyskania wysokiej twardości, wynoszącej około 65 HRC przyjęto temperaturę austenitowania 1150°C , a temperaturę odpuszczania 560°C . Właściwie dobrana temperatura odpuszczania umożliwia powstanie zjawiska twardości wtórnej. Tak przygotowane ostrza zachowują zdatność do skrawania w podwyższonej temperaturze, bliskiej temperaturze odpuszczania materiału ostrza [1, 4, 6, 10]. Ze względu na niską przewodność cieplną materiał stopniowo podgrzewano. Powodem, dla którego cały proces odbył się w próżni, było ryzyko odwęglenia i utlenienia.

Do badań przeznaczono materiał obrabiany w postaci wałków o średnicy 110 mm i długości 350 mm, ze stali do ulepszania cieplnego 40HM-T o twardości 30 HRC. Jest to gatunek stosowany na odpowiedzialne elementy o dużej wytrzymałości i ciągliwości. Granica plastyczności wynosi 880 MPa, a wytrzymałość na rozciąganie 1030 MPa. W tabeli 2 przedstawiono skład chemiczny stali 40HM-T [6, 7].

Tabela 2. Orientacyjny skład chemiczny stali 40HM-T (według PN-EN ISO 4597)

Table 2. Approximate chemical composition of the 40HM-T steel (acc. to PN-EN ISO 4597)

Skład chemiczny [%]									
C	Mn	Si	P,S	Cr	Ni	Mo	W	V	Cu
0,38-0,45	0,4-0,7	0,17-0,37	<0,035	0,8-1,2	<0,3	0,15-0,25	<0,2	<0,05	<0,25

Badania zużycia i trwałości ostrzy skrawających prowadzono w procesie toczenia wzdłużnego stali 40HM-T ulepszonej cieplnie do twardości 26 ± 2 HRC. Wymienne płytki skrawające mocowano w uchwycie hR 110.16-220. Po zamocowaniu płytki skrawającej w uchwycie uzyskano następującą geometrię: kąt wierzchołkowy $\kappa_r = 75^\circ$, kąt przyłożenia $\alpha_0 = 6^\circ$, kąt naroża $\varepsilon_r = 90^\circ$, kąt natarcia $\gamma_0 = -6^\circ$, kąt pochylenia $\lambda_s = -6^\circ$.

Przyjęto następujące warunki obróbki: materiał obrabiany – stal 40 HM-T, prędkość skrawania $v_c = 33,75; 42,9; 59,86$ m/min, posuw $f = 0,204$ mm/obr., głębokość skrawania $a_p = 0,75$ mm, skrawanie „na sucho” lub w obecności płynu chłodząco-smarującego. Podczas toczenia stosowano ciecz obróbkową w postaci półsyntetycznej emulsji Statoil Toolway S455N produkcji norweskiej.

3. Badania doświadczalne

Najczęściej trwałość ostrza określa się jako czas skrawania do chwili osiągnięcia przyjętej wartości umownego wskaźnika stępienia. Biorąc pod uwagę

krzywe zużycia uzyskane w badaniach wstępnych oraz dane z innych publikacji i norm: PN-83/M-58350; PN-ISO 3685, za wskaźnik stępienia przyjęto szerokość pasma zużycia naroża od strony powierzchni przyłożenia $VB_c = 1,6$ mm. Tak jak podano w poprzednim rozdziale, przedmiotem badań zasadniczych były zarówno płytki skrawające ze stali szybkoobrotowych wytworzonych konwencjonalnie, jak i powstałe w procesie metalurgii proszków. Przed przekazaniem płytek do badań przeprowadzono oględziny powierzchni natarcia, przyłożenia i krawędzi skrawającej, tak aby żadna płytka skrawająca nie miała defektów w postaci wykruszeń, wyszczerbień czy pęknięć. Otrzymane na podstawie badań krzywe zużycia pozwoliły na wyznaczenie wartości trwałości ostrzy skrawających dla wskaźnika stępienia $VB_c = 1,6$ mm. Wyniki trwałości ostrzy z konwencjonalnej i spiekanej stali szybkoobrotowej przy obróbce stali 40HM-T bez płynu oraz z płynem chłodząco-smarującym przedstawiono w tab. 3.

Tabela 3. Wyniki badań trwałości uzyskane podczas skrawania stali 40HM-T

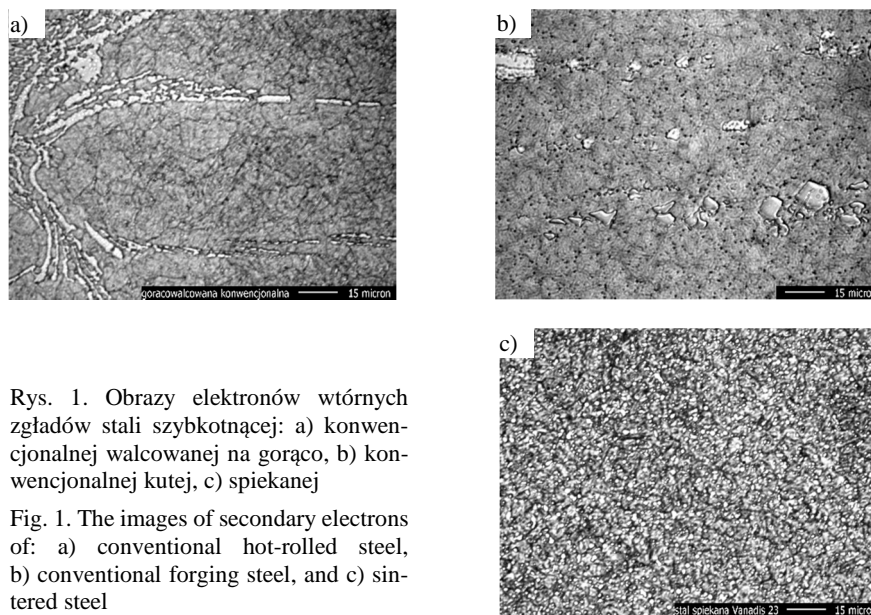
Table 3. Results of durability investigations obtained during machining of the 40HM-T steel

Opis	Trwałość podczas skrawania na sucho			Trwałość podczas skrawania z płynem chłodząco-smarującym [s]		
	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3
v_c [m/min]						
HS6-5-2	595	266,4	141	772	349,9	192
PM6-5-2	460	286	192	834	599,4	336

Badania weryfikacyjne miały na celu określenie przyczyn odmiennego zachowania się (zróżnicowanej trwałości przy różnych wartościach v_c) płytek skrawających ze stali konwencjonalnej i spiekanej w trakcie toczenia stali do ulepszenia cieplnego 40HM-T. Wykonano po 8 pomiarów składu chemicznego konwencjonalnej i spiekanej stali szybkoobrotowej. Średnie wartości zawartości pierwiastków stopowych nie odbiegały istotnie od podanych w tab. 1.

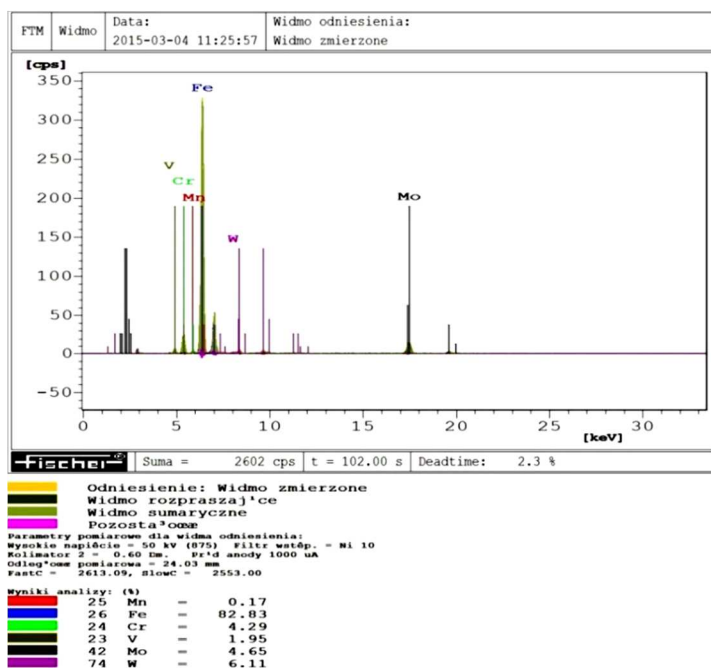
Za pomocą mikroskopu skaningowego Tescan Vega 5135 wykonano serię zdjęć zglądów metalograficznych ostrzy z konwencjonalnej i spiekanej stali szybkoobrotowej (rys. 1). Zdjęcia potwierdziły dużo bardziej równomierne rozmieszczenie węglików w osnowie w przypadku stali spiekanej.

W przypadku konwencjonalnej stali szybkoobrotowej zakupionej w Szwecji, pomimo dobrego przekucia w celu rozbicia siatki węglików, można było zauważyć, że węgliki nie są równomierne rozłożone i tworzą miejscami pasmowe skupiska, co jest typowym objawem występującym w przypadku stali szybkoobrotowych poddanych walcowaniu, kuciu wydłużającemu lub kuciu wydłużającemu z pośrednim spęczaniem. Zdjęcia powierzchni ostrzy z konwencjonalnej i spiekanej stali szybkoobrotowej wykonano za pomocą mikroskopu metalograficznego Neophot 32. Rzeczywisty skład chemiczny ostrzy skrawających sprawdzono za pomocą spektrometru fluorescencji rentgenowskiej – Fischerscope X-ray XDV-SDD Fisher. Przykładowe wyniki tych badań przedstawiono na rys. 2.



Rys. 1. Obrazy elektronów wtórnych zglądów stali szybko tnącej: a) konwencjonalnej walcowanej na gorąco, b) konwencjonalnej kutej, c) spiekanej

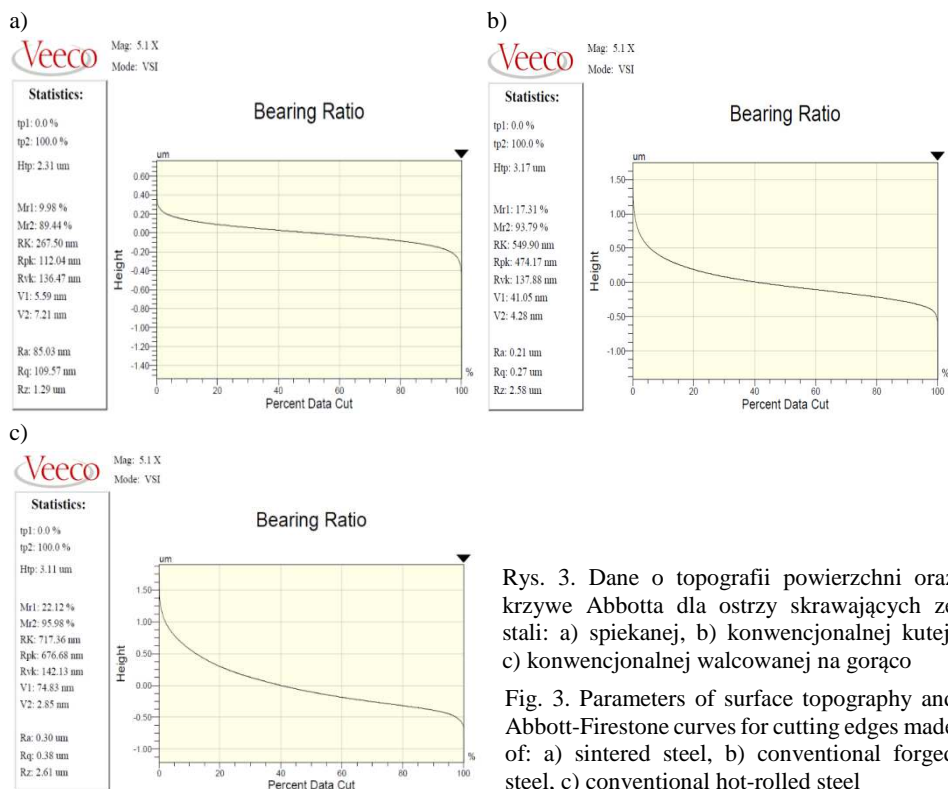
Fig. 1. The images of secondary electrons of: a) conventional hot-rolled steel, b) conventional forging steel, and c) sintered steel



Rys. 2. Przykładowy obraz mikroanalizy składu chemicznego ostrzy

Fig. 2. Exemplary image of chemical microanalysis of cutting edges

Otrzymane obrazy z mikroskopu wskazują na istotną różnicę w morfologii powierzchni konwencjonalnej i spiekanej stali szybko tnącej. Powierzchnię stali spiekanej tworzą ziarna o ostrych krawędziach, natomiast po walcowaniu i kuciu powierzchnia nie posiada takiej topografii (ziarna są „zlane”, tworząc bardziej ciągłą powierzchnię), mimo że obie powierzchnie mają podobną chropowatość $Ra = 0,1 \mu\text{m}$. Na rysunku 3 przedstawiono wybrane dane topografii powierzchni oraz krzywe Abbotta dla ostrzy skrawających ze stali: spiekanej, konwencjonalnej kutej oraz konwencjonalnej walcowanej na gorąco.



Rys. 3. Dane o topografii powierzchni oraz krzywe Abbotta dla ostrzy skrawających ze stali: a) spiekanej, b) konwencjonalnej kutej, c) konwencjonalnej walcowanej na gorąco

Fig. 3. Parameters of surface topography and Abbott-Firestone curves for cutting edges made of: a) sintered steel, b) conventional forged steel, c) conventional hot-rolled steel

Zmierzone wartości parametrów topografii powierzchni pozwoliły na określenie objętości olejowej powierzchni ostrzy skrawających z konwencjonalnej kutej, konwencjonalnej walcowanej na gorąco i spiekanej stali szybko tnącej. Objętość olejową powierzchni obliczono na podstawie wzoru:

$$V_o = R_{vk}(100 - M_{r2}) / 2000 \text{ [mm}^3\text{/cm}^2\text{]} \quad (1)$$

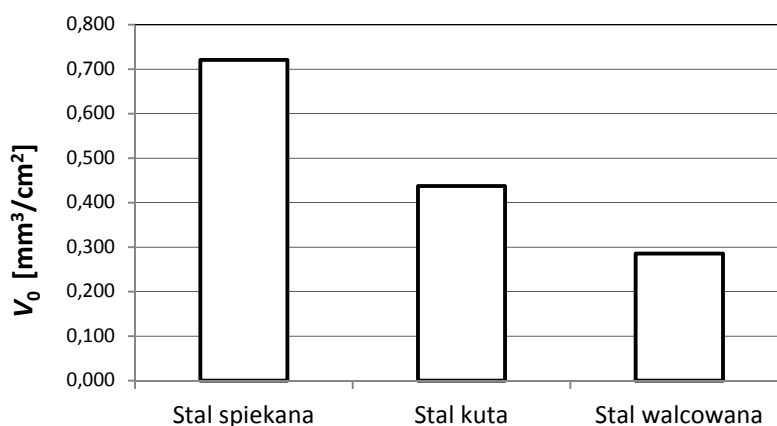
gdzie: V_o – objętość olejowa powierzchni,

M_{r2} – udział materiałowy dla dolnej granicy rdzenia profilu chropowatości,

R_{vk} – wgłębienie powierzchni.

Parametr M_{r2} określa wartość udziału materiałowego dla dolnej granicy rdzenia profilu chropowatości (odpowiednio M_{r1} to wartość udziału materiałowego dla górnej granicy rdzenia profilu chropowatości), natomiast parametr R_{vk} opisuje wgłębienia powierzchni. Jest on miarą zdolności eksploatowanych powierzchni ostrza do utrzymywania smaru w istniejących wgłębieniach.

Opisane parametry dają informację o strukturze profilu nierówności, która w dużej mierze determinuje funkcjonalne zachowanie się ostrza w czasie pracy skrawania [6, 7]. Na rysunku 4 przedstawiono wyniki średnich wartości objętości olejowej dla ostrzy skrawających ze stali szybko tnącej: spiekanej, konwencjonalnej kutej i konwencjonalnej walcowanej na gorąco. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że mimo wręcz identycznej chropowatości płytek skrawających z konwencjonalnej i spiekanej stali szybko tnącej ($Ra = 0,1 \mu\text{m}$) różnią się one znacznie pod względem objętości olejowej. Powierzchnia spiekanej stali szybko tnącej charakteryzuje się około 2-krotnie większą objętością olejową od kutej konwencjonalnej stali szybko tnącej, a nawet blisko 3-krotnie większą od walcowanej na gorąco konwencjonalnej stali szybko tnącej.



Rys. 4. Średnie wartości objętości olejowej powierzchni dla ostrzy skrawających ze stali szybko tnącej: spiekanej, konwencjonalnej kutej oraz konwencjonalnej walcowanej na gorąco

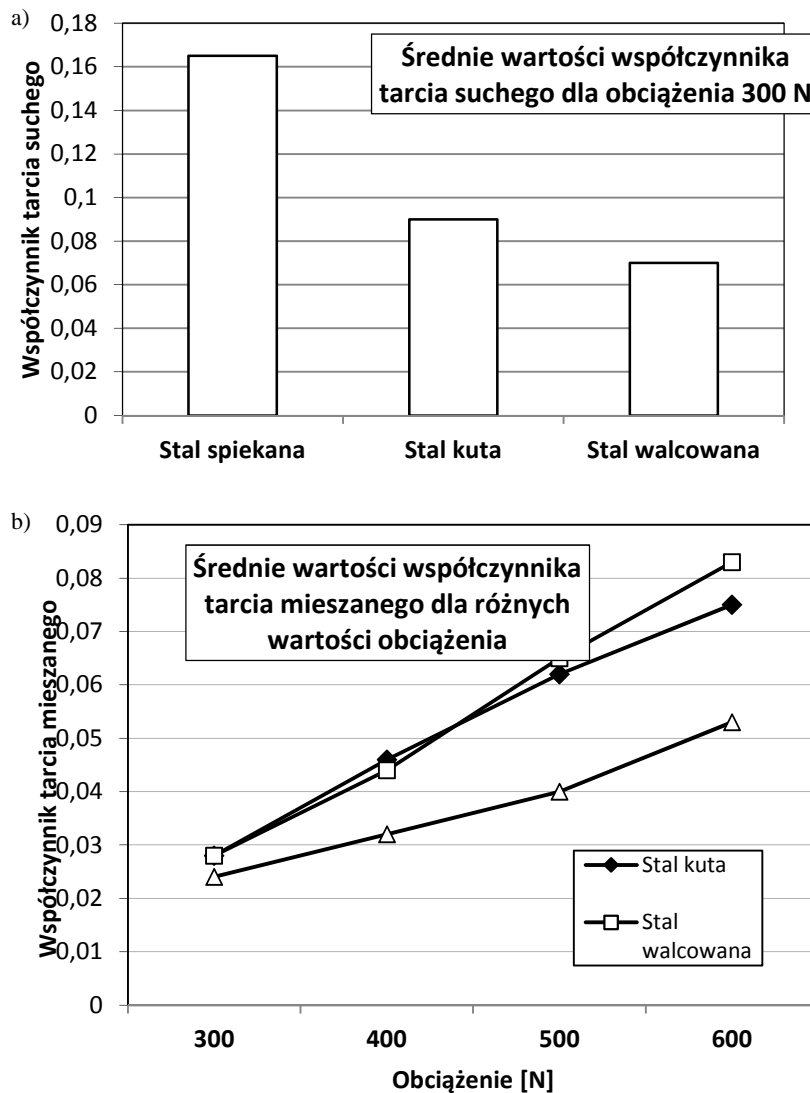
Fig. 4. Average values of oil volume of surfaces of the cutting edges made of both sintered, conventional forging and conventional hot-rolled high-speed steels

W celu dokonania pełnej interpretacji badań właściwości eksploatacyjnych ostrzy skrawających podczas toczenia stali do ulepszenia cieplnego przeprowadzono dodatkowo badania współczynnika tarcia suchego i w obecności płynu chłodząco-smarującego. Podczas badań tribologicznych zastosowano następujące warunki:

- próbka: stal konwencjonalna HS6-5-2, spiekana PM6-5-2,
- przeciwpółka: stal 40HM-T,
- prędkość obwodowa przeciwpółki: 27,6 m/min,

- obciążenie F : 300/400/500/600 N,
- czas t : 1200 s dla tarcia suchego, 2400 s dla tarcia mieszanego,
- tarcie: suche, w obecności emulsji chłodząco-smarującej Statoil Cimstar MB.

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki badań współczynnika tarcia suchego i mieszanego.



Rys. 5. Średnie wartości współczynnika tarcia stali szybkotnących o stal 40HM-T w warunkach tarcia suchego (a) oraz mieszanego (b)

Fig. 5. Mean values of friction coefficient of high-speed steel against 40HM-T steel at dry (a) and mitigated solid conditions (b)

Wyniki badań tribologicznych potwierdziły rezultaty trwałości ostrzy podczas tarcia „na sucho” oraz w obecności płynu chłodząco-smarującego, jak też obserwacje obrazów SE z mikroskopu skaningowego.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- ostrza skrawające wykonane ze stali spiekanej wykazują nieco lepsze właściwości technologiczne (np. bardziej równomierny rozkład węglików – brak niekorzystnej pasmowości powstającej w procesach kucia lub walcowania konwencjonalnych stali szybko tnących),
- w warunkach skrawania „na sucho” ostrza skrawające z konwencjonalnej stali szybko tnącej przy najmniejszej z zastosowanych prędkości skrawania ($v_c = 33,75$ m/min) charakteryzowały się większą trwałością niż stale spiekane ze względu na korzystniejszą morfologię powierzchni (brak ziaren o ostrych krawędziach, a tym samym mniejsza wartość współczynnika tarcia suchego),
- ostrza skrawające ze spiekanej stali szybko tnącej podczas skrawania z płynem chłodząco-smarującym wykazywały znacznie większą trwałość niż ostrza z konwencjonalnej stali szybko tnącej, ze względu na większą objętość olejową powierzchni, wpływającą na mniejszą wartość współczynnika tarcia o materiał obrabiany.

Podziękowania

Autorzy składają podziękowanie dr. inż. R. Majchrowskiemu z Politechniki Poznańskiej za pomoc przy pomiarach chropowatości powierzchni.

Literatura

- [1] Bolton J.D., Gant A.J.: Heat treatment of PM HSS metal matrix composites, Proc. European Conf. Advanced PM Materials, Birmingam 1995, 1:388-95.
- [2] Dobrzański A.: Metaloznawstwo i obróbka cieplna materiałów narzędziowych, WNT, Warszawa 1990.
- [3] Dobrzański A.: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego, WNT, Warszawa 2002.
- [4] Górski E.: Poradnik narzędziowca, WNT, Warszawa 1989.
- [5] Harlin P., Olsson M.: Abrasive wear resistance of starch consolidated and sintered high speed steel, Wear, 267 (2009) 1482-1489.
- [6] Katalog firmy Fischer.
- [7] Katalog firmy Sandvik.
- [8] Kupczyk M.J.: Inżynieria powierzchni – narzędzia skrawające, Wydawn. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2015.

- [9] Kupczyk M.J.: Wytwarzanie i eksploatacja narzędzi skrawających z powłokami przeciwzużyciowymi, Wydawn. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2009.
- [10] Mesquita H.A., Barbosa C.A.: Evaluation of as-hipped PM high speed steel for production of large-diameter cutting tools, Mater. Sci. Forum, 416-418 (2003) 235-240.
- [11] Mesquita R.A., Barbosa C.A.: High-speed steels produced by conventional casting, spray forming and powder metallurgy, Mater. Sci. Forum, 496-499 (2005) 244-250.
- [12] Zhang G. et al.: Microstructure evolution and mechanical properties of T15, high speed steel prepared by twin-atomiser spray forming and thermo-mechanical processing”, Mater. Sci. Eng. A, 558 (2012) 566-571.

COMPARATIVE INVESTIGATIONS OF SELECTED PROPERTIES OF CUTTING EDGES MADE OF FORGING, HOT-ROLLED AND SINTERED HIGH-SPEED STEELS

S u m m a r y

In this article, to clarify the different properties of cutting blades made of conventional and sintered high-speed steels during machine cutting of 40HM-T steel machined at various cutting speeds and various lubrication conditions, the verification investigations of the blades consisting of chemical composition, hardness, structure, surface oil volume of surface and friction coefficient have been carried out. At the end of the article, recommendations on the range of applicability of the tested tool materials have been included.

Keywords: conventional and sintered high-speed steels, durability, friction coefficient, oil volume of surface

DOI: 10.7862/rm.2017.30

Otrzymano/received: 12.07.2017

Zaakceptowano/accepted: 23.09.2017