



Wpływ separacji jonów azotu w procesie implantacji warstwy wierzchniej ostrzy WC-Co na ich trwałość podczas frezowania płyty wiórowej

The effect of nitrogen ions separation in the implantation process of the WC-Co tools surface layer on their lifetime during chipboard milling

Jacek Wilkowski^{a,*}, ORCID: 0000-0001-5798-6761
Marek Barlak^b, ORCID: 0000-0003-1416-7461
Roman Böttger^c, ORCID: 0000-0003-3262-6051
Zbigniew Werner^b, ORCID: 0000-0003-1172-0268

^aSzkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Technologii Drewna, Katedra Mechanicznej Obróbki Drewna, ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa, Polska

^bNarodowe Centrum Badań Jądrowych Świerk w Otwocku, Departament Fizyki Materiałów, Zakład Technologii Plazmowych i Jonowych, ul. Andrzeja Sołtana 7, 05-400 Otwock, Polska

^cHelmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Bautzner Landstrasse 400, 01328 Dresden, Germany

*Osoba do korespondencji: jacek_wilkowski@sggw.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wpływ separacji jonów azotu w procesie implantacji warstwy wierzchniej ostrzy ze standardowego węgla spiekane (WC-Co). Ostrza w postaci noży wymiennych do głowic frezarskich modyfikowano z wykorzystaniem implantatorów z separacją i bez separacji jonów. Trwałość ostrzy modyfikowanych dwoma sposobami oraz ostrzy kontrolnych (niemodyfikowanych) weryfikowano podczas frezowania trójwarstwowej płyty wiórowej przy stałych parametrach skrawania. Obróbkę zrealizowano na sterowanym numerycznie centrum obróbczym CNC. Kryterium stępienia ostrza była wartość 0,2 mm bezpośredniego wskaźnika zużycia, mierzona na powierzchni przyłożenia, określana jako maksymalna szerokość pasma starcia (VB_{max}). Proces implantacji istotnie zwiększał całkowitą drogę frezowania płyty drewnopochodnej do uzyskania przez ostrze bezpośredniego kryterium stępienia. Wykazano również wpływ separacji jonów w procesie implantacji na trwałość frezarskich noży wymiennych. Implantacja bez separacji jonów azotu zwiększała średnią trwałość ostrzy, podwyższając jednocześnie ich trwałościowy

współczynnik zmienności. Natomiast, zastosowanie separacji jonów w mniejszym stopniu podwyższało trwałość, jednocześnie obniżając współczynnik zmienności trwałości ostrzy.

Abstract

The paper presents the effect of nitrogen ion separation in the implantation process of the tools surface layer made of standard cemented carbide (WC-Co). The tools in the form of indexable knives for milling heads were modified with the use of implantation devices with and without ion separation. The lifetime of tools modified by two methods and the control tools (virgin, unmodified) were verified during milling of three-layer chipboard with constant cutting parameters. The machining was carried out on a CNC machining center. The criterion of blunting tools was the value of 0.2 mm of the direct wear indicator, measured on the flank surface, defined as the maximum width of wear zone (VB_{max}). The implantation process significantly increased the total milling length of wood-based panel until the tool achieved a direct blunting criterion. The influence of ion separation in the implantation process on the lifetime of milling indexable knives has also been demonstrated. Implantation without separation of nitrogen ions increased the average lifetime of the blades, while increasing their durability coefficient of variation. On the other hand, the use of ion separation increased the lifetime to a lesser extent, while reducing the coefficient of variation of tool life.

Słowa kluczowe: węgiel spiekany WC-Co, implantacja jonów azotu, separacja jonów, płyta wiórowa, frezowanie CNC, trwałość narzędzia

Keywords: WC-Co cemented carbide, nitrogen ion implantation, ions separation, chipboard, CNC milling, tool life

Wprowadzenie

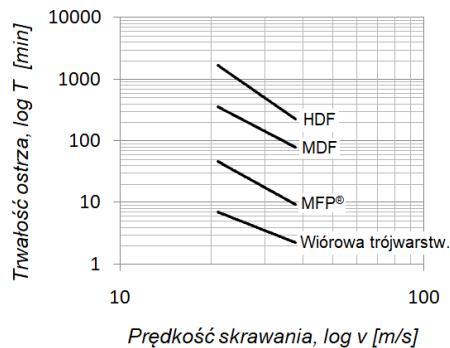
Trójwarstwowa płyta wiórowa to dominujący materiał konstrukcyjny w produkcji mebli. Jej wysokie walory użytkowe stoją w dużej sprzeczności z wyjątkowo złą skrawalnością związaną z trwałością narzędzi podczas wiórowej obróbki. Różnice w trwałości ostrzy podczas frezowania płyty wiórowej i płyty pilśniowej wysokiej gęstości (HDF) mogą być ponad stukrotne na niekorzyść tej pierwszej, co jest dużym problemem technologicznym wpływającym na kosztocłonność wytwarzania. Na Rys. 1 pokazano zależność trwałości ostrza od prędkości skrawania w układzie podwójnie logarytmicznym. Wykres potwierdza złą renomę płyty wiórowej. Rys. 2 wskazuje na prawdopodobną przyczynę tak niskiej trwałości związaną z zawartością zanieczyszczeń mineralnych w płytach. Wysokie korelacje zawartości piasku w materiale obrabianym z trwałością narzędzia zmuszają do poszukiwania nowatorskich rozwiązań zwiększających odporność ostrza na mechanizmy zużycia związane właśnie z tą cechą materiału.

Niewątpliwie zawartość piasku w płycie wiórowej będzie sprzyjała następującym mechanizmom zużycia ostrza skrawającego:

- ściernym - w postaci mikroskrawania, bruzdowania (odkształcenia plastyczne) i rysowania - zużycie to jest odwrotnie proporcjonalne do twardości z nielicznymi wyjątkami - duża twardość to duża kruchość, a zatem mała plastyczność w warunkach procesu mikroskrawania,

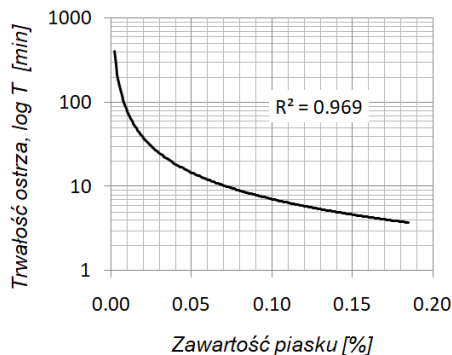
- wytrzymałościowym - objawiające się wyszczerbieniami, wykruszeniami, wytłamaniami i pęknięciami, jest wynikiem przekroczenia wytrzymałości doraźnej (stałe, statyczne obciążenie) lub zmęczeniowej (spowodowane obciążeniem cyklicznym podczas tarcia powodującym naprzemienne obciążenia ściskająco-rozciągające),

- erozyjnym - uderzenia cząstek mineralnych (piasku) usuwają fragmenty materiału ostrza pod wpływem pędu.



Rys. 1. Wpływ prędkości skrawania na trwałość ostrzy wybranych płyt drewnopochodnych (Wilkowski, Barlak 2018a)

Fig. 1. The influence of cutting speed on the tool life of selected wood-based panels



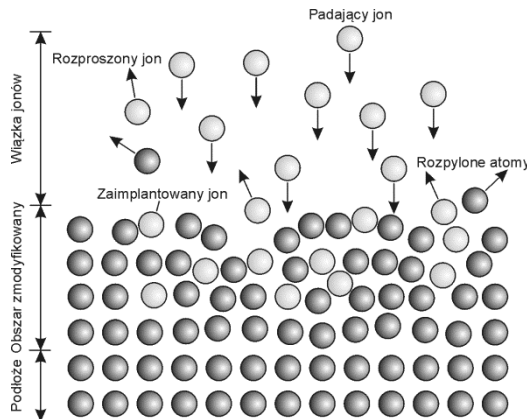
Rys. 2. Wpływ zanieczyszczeń mineralnych płyt drewnopochodnych na trwałość ostrzy z węgla spiekane podczas frezowania (Wilkowski, Barlak 2018a)

Fig. 2. The influence of wood-based panels mineral impurities on the lifetime of cemented carbide tools during milling

Wymienione mechanizmy zużycia nie wyczerpują pełnego zestawu fizycznych, a także chemicznych procesów zachodzących podczas skrawania między dwoma przeciwdziałającymi materiałami, w tym: mikroskrawania, bruzdowania, deformacji plastycznych, pękania, złamania, stapiania, utleniania, dyfuzji, adhezji czy interakcji chemicznych (Porankiewicz, Chamot 2005).

Trwały materiał ostrza ma być odpowiedzią na działanie przedstawionych mechanizmów. Z tego punktu widzenia węgiel spiekany WC-Co charakteryzujący się wysoką twardością, sztywnością i odpornością na wysoką temperaturę (Sheikh-Ahmad, Bailey 1999) aspiruje do odgrywania dominującej roli wśród wszystkich materiałów narzędziowych. Nie mniej jednak, naukowcy cały czas pracują nad poprawą odporności na kruche pęknięcie WC-Co i ograniczeniem działania mechanizmu wytrzymałościowego i erozyjnego podczas obróbki płyt wiórowych. Jedną z takich prób jest modyfikacja warstwy wierzchniej ostrzy w procesie implantacji jonów.

Implantacja jonów jest przykładem metody domieszkowania materiałów. Zjonizowane atomy są przyspieszone w polu elektrycznym do energii od kilkudziesięciu do kilkuset kiloelektronowoltów (co odpowiada ich prędkości od setek do tysięcy kilometrów na sekundę) są formowane w wiązkę i kierowane, a następnie wbijane (implantowane) do powierzchni modyfikowanego materiału (Rys. 3). Oprócz zmian fizycznych takich jak deformacja sieci (wprowadzenie naprężeń), następują zmiany składu chemicznego implantowanego materiału. Atomy wprowadzonej domieszki mogą np. utworzyć wydzielenia, bądź wejść w reakcje z pierwiastkami modyfikowanego materiału i utworzyć nowe fazy (Barlak i in. 2016, 2017). Należy dodać, że jest to proces niskotemperaturowy, jak również to, że w porównaniu do narzędzi z powłokami antyściernymi nie występuje tu problem odrywania (delaminacji) powłoki (Wilkowski, Barlak 2018a).



Rys. 3. Schemat modyfikacji warstwy wierzchniej w procesie implantacji jonów
Fig. 3. The scheme of surface layer modification in ion implantation process

Podwyższenie trwałości materiałów narzędziowych w wyniku procesu implantacji jonów zaobserwowano podczas obróbki metali (Kanazawa, Chijiwa, 1988, Mikkelsen, Straede 1992, Narojczyk i in. 2005, Onikura i in. 1988) jak również podczas skrawania materiałów drzewnych (Raebel i in. 1990, Wilkowski i in. 2018b, 2018c, 2019). W metodzie tej pokładane są duże nadzieje w ograniczeniu zużycia wytrzymałościowego ostrzy WC-Co podczas obróbki trudnoskrawalnych płyt wiórowych, szczególnie w kompozytach z nanoziarnistego węgliku wolframu charakteryzującego się dużą twardością (powyżej 2400 HV30), ale jednocześnie zwiększoną podatnością na kruche pękanie.

Cel i zakres pracy

Celem pracy było zbadanie wpływu separacji masowej jonów azotu w procesie implantacji warstwy wierzchniej ostrzy WC-Co na ich trwałość podczas frezowania trójwarstwowej płyty wiórowej.

Zakres pracy obejmował zamodelowanie procesu implantacji oraz modyfikację warstwy wierzchniej komercyjnie dostępnych frezarskich noży wymiennych WC-Co przy użyciu implantatorów z separacją masową jonów i bez takiej separacji, a następnie przeprowadzenie badań trwałościowych na frezarskim centrum obróbczym CNC podczas obróbki płyty wiórowej.

Materiały i metodyka badań

W badaniach wykorzystano wymienne czterostrzowe noże do głowic frezarskich z węgliku spiekanego WC-Co (rodzaj KCR08, firmy Ceratizit, Austria) o wymiarach 29,5×12,0×1,5 mm³ (Rys. 4). Podstawowe właściwości badanego węgliku spiekanego przedstawiono w Tabeli 1. Dwie grupy noży poddano modyfikacjom, trzecia grupa stanowiła wariant kontrolny, nie poddany modyfikacji. Liczebność każdej grupy wynosiła po trzy noże, co dawało dwanaście ostrzy w każdym wariantcie.

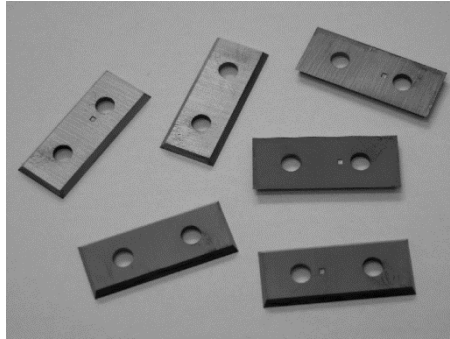
Tabela 1. Podstawowe właściwości frezarskich noży wymiennych WC-Co do obróbki materiałów drzewnych wykorzystywanych w badaniach (www.ceratizit.com/en/products/wood-stone-working)

Table 1. The basic properties of WC-Co milling indexable knives for wood-based materials machining used in research

Oznaczenie	Producent	Wielkość ziarna WC	Zawartość spoiwa Co	Gęstość	Twardość			Wytrzymałość na zginanie	
		µm	%	g/cm ³	HV10	HV30	HRA	MPa	P.S.I.
KCR08	Ceratizit (Austria)	0,5-0,8	3,2	15,2	1920	1885	93,4	2300	334

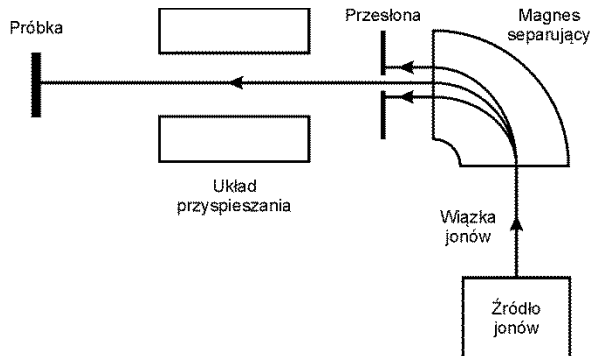
Pierwsza z modyfikacji polegała na implantacji powierzchni przyłożenia ostrzy z wykorzystaniem implantatora bez separacji masowej jonów azotu i odbyła się w Narodowym Centrum Badań Jądrowych Świerk w Otwocku. W drugiej modyfikacji

wykorzystano implantator z masową separacją jonów azotu i zrealizowano ją w Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf w Dreźnie.



Rys. 4. Noże wymienne WC-Co do głowic frezarskich
Fig. 4. The WC-Co indexable knives for milling heads

Schemat implantatora z separacją masową przedstawiono na Rys. 5, zaś różnice w składzie jonowym wiązki oraz podstawowe parametry dwóch wariantów modyfikacji warstwy wierzchniej WC-Co - w Tabeli 2.



Rys. 5. Schemat implantatora jonów z separacją masową (Barlak i in. 2016)
Fig. 5. The scheme of the ion implanter with mass separation

Procesy implantacji jonów były poprzedzone modelowaniem profili głębokościowych azotu w warstwie wierzchniej WC-Co. Modelowanie przeprowadzono z wykorzystaniem pakietu oprogramowania SRIM-2013.00. Kod źródłowy programu SRIM oparty jest na metodzie symulacji Monte Carlo, stosowanej w modelowaniu procesów złożonych na tyle, aby można było przewidzieć ich wyniki przy użyciu podejścia analitycznego. Każde modelowanie przeprowadzono dla 100 tys. implantowanych jonów azotu.

Tabela 2. Procentowy rozkład jonów w przeprowadzonych procesach implantacji (Krivonosienko i in. 2001)

Table 2. The percentage distribution of ions in performed implantation processes

Wariant modyfikacji WC-Co	Implantowane jony azotu	Energia jonów dla napięcia przyspieszającego 50 kV (keV)		Średnia krotność jonizacji (ACS)	Dawka jonów (cm ⁻²)
		25	50		
		Procentowy rozkład jonów (%)			
		1+			
Bez separacji masowej	N ₂ ⁺ + N ⁺	67	33	0,67	5e17
Z separacją masową	N ⁺	-	100	1,00	
	N ₂ ⁺	100	-		

Materiałem obrabianym była trójwarstwowa płyta wiórowa o grubości 18 mm. W celu dokładnej charakterystyki materiału obrabianego określono istotne z punktu widzenia oporów skrawania właściwości fizyko-mechaniczne (Tabela 3). Badania właściwości płyt przeprowadzono zgodnie z normami: PN-EN 310, PN-EN 323 i ISO 3340.

Tabela 3. Wybrane właściwości badanej trójwarstwowej płyty wiórowej

Table 3. The selected properties of the tested three-layer particleboard

Płyta drewnopochodna	Gęstość (kg/m ³)	Twardość Brinella	Wytrzymałość na zginanie (%)	Moduł sprężystości (MPa)	Zawartość piasku (%)
Wiórowa trójwarstwowa	649	2,6	8,7	2212	0,185

Płyty frezowano na centrum obróbczym CNC Busellato Jet 130 z wykorzystaniem jednostrzowej głowicy frezarskiej Faba FTS.07L4043.01 o średnicy 40 mm. Skrawano rowki o głębokości 6 mm w formatkach płytowych o wymiarach 1000×400×18 mm³ ze stałymi parametrami skrawania (prędkość obrotowa narzędzia 18 tys. obr./min, posuw na ostrze 0,15 mm).

Po każdym 1 m drogi posuwu narzędzia w materiale oceniano pod mikroskopem narzędziowym bezpośredni wskaźnik zużycia ostrza, czyli maksymalne pasmo starcia na powierzchni przyłożenia - VB_{max} (Rys. 6). Kryterium stępienia ostrza, czyli wartością wskaźnika bezpośredniego VB_{max} od której uznawano narzędzie za stępione i nie kontynuowano obróbki była wartość 0,2 mm. Droga skrawania od rozpoczęcia obróbki ostrzem nowym (niepracującym), aż do zmierzonej wartości wskaźnika VB_{max} równej 0,2 mm była wskaźnikiem trwałości ostrza. W każdej grupie modyfikacji ostrzy oraz w grupie kontrolnej (niemodyfikowanej) przebadano po 12 ostrzy (w sumie 36 ostrzy). Średnia droga skrawania uzyskana dla ostrzy kontrolnych oraz dla ostrzy w poszczególnych grupach modyfikacji była wykorzystywana do wyliczenia względnego wskaźnika trwałości ostrzy wg wzoru:

$$RI = L_m/L_k \quad (1)$$

gdzie:

RI - względny wskaźnik trwałości ostrzy,

L_m - średnia droga skrawania uzyskana dla ostrzy w danym wariancie modyfikacji w (m),

L_k - średnia droga skrawania ostrzy kontrolnych w (m).

W poszczególnych grupach modyfikacji ostrzy oraz dla grupy kontrolnej wyliczono współczynniki zmienności trwałości ostrzy wg wzoru:

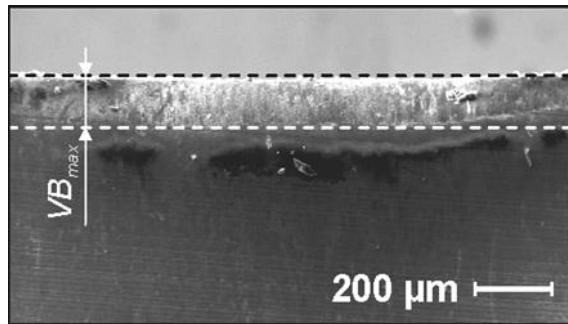
$$CV = \sigma_L / L \quad (2)$$

gdzie:

CV - współczynnik zmienności trwałości ostrzy,

σ_L - odchylenie standardowe średniej drogi skrawania w (m),

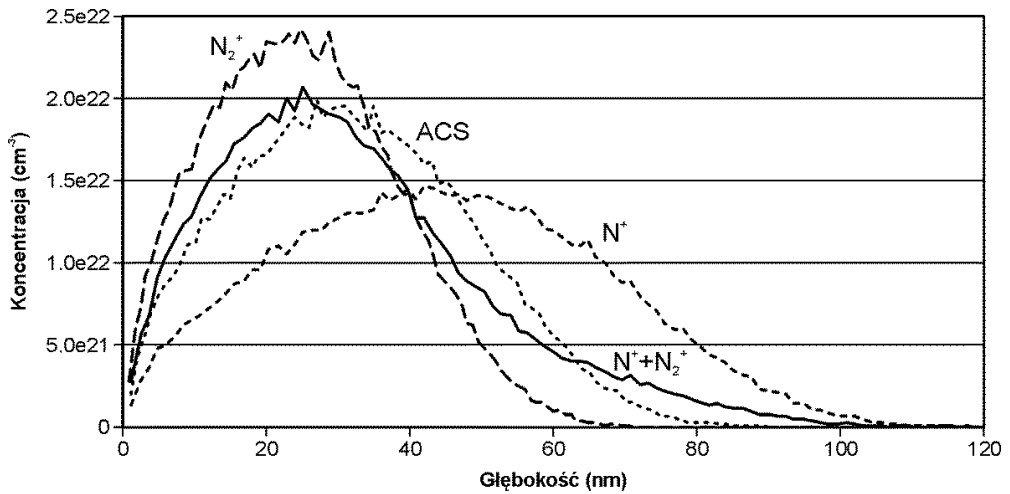
L - średnia droga skrawania w (m).



Rys. 6. Bezpośredni wskaźnik zużycia ostrza VB_{max}
Fig. 6. Direct tool wear indicator VB_{max}

Wyniki badań i analiza

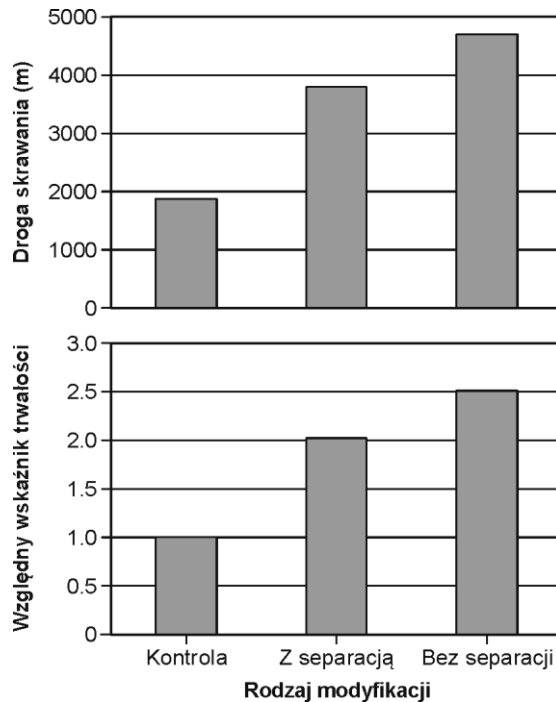
Na Rys. 7 przedstawiono wyniki modelowania profili głębokościowych dla wszystkich rodzajów jonów azotu, tj. $N^+ + N_2^+$, średniej krotności jonizacji (ang. *Average Charge State*, ACS), N^+ i N_2^+ , dla napięcia przyspieszającego 50 kV i dawki jonów $5e17 \text{ cm}^{-2}$. Widać, że profil uzyskany dla N_2^+ jest najwyższy i najwęższy ze wszystkich, natomiast najszerszy i najniższy jest profil uzyskany dla N^+ (modyfikacja z separacją masową). Pośrednie profile głębokościowe wykazują jony $N^+ + N_2^+$ (modyfikacja bez separacji masowej) oraz profil wyznaczony dla średniej krotności jonizacji. Zatem jony o większej masie modyfikują warstwę wierzchnią WC-Co płycej, ale ich maksymalna koncentracja w strefie modyfikacji będzie większa, natomiast jony o mniejszej masie modyfikują głębiej, lecz ich maksymalna koncentracja będzie mniejsza.



Rys. 7. Modelowane profile głębokościowe zaimplantowanej warstwy wierzchniej noży WC-Co
Fig. 7. The modeled depth profiles of the implanted surface layer of WC-Co knives

Modyfikacja ostrzy w procesie implantacji jonów azotu zwiększała trwałość ostrzy w każdym przypadku. Średnia droga skrawania zrealizowana przez ostrza po implantacji (niezależnie od stosowania bądź nie separacji masowej jonów) była ponad dwukrotnie wyższa od tej zrealizowanej przez ostrza w grupie kontrolnej (Rys. 8). Najwyższy względny wskaźnik trwałości ostrzy uzyskano dla implantacji bez separacji jonów i wyniósł on 2,51. Ostrza modyfikowane z separacją jonów uzyskały wskaźnik na poziomie 2,03 (Rys. 8).

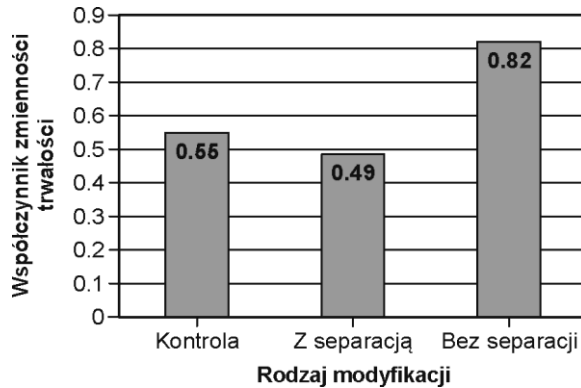
Lepsze efekty modyfikacji ostrzy w procesie implantacji bez separacji jonów od implantacji z separacją można tłumaczyć różnicami w rozkładzie jonów na profilach głębokościowych. Uzyskano wyższą koncentrację jonów $N^+ + N_2^+$ (bez separacji) niż jonów N^+ (z separacją) w warstwie wierzchniej ostrzy, choć zasięgi głębokościowe profili w tych dwóch wariantach są podobne.



Rys. 8. Droga skrawania oraz względny wskaźnik trwałości ostrzy modyfikowanych oraz kontrolnych

Fig. 8. The cutting length and relative tool life index of modified and control blades

Jakość przeprowadzenia procesu modyfikacji charakteryzuje się współczynnikiem zmienności (Kacew 1978). Należy dobitnie podkreślić, że dobra modyfikacja ostrza to nie tylko zwiększa średnią trwałość ostrzy, ale jednocześnie nie może ona zwiększać współczynnika zmienności trwałości. Z punktu widzenia obróbki przemysłowej jest ważne, żeby ostrza pracowały długo, ale ważniejsze - żeby ich poszczególne trwałości były podobne, czyli aby zmienność trwałości była jak najmniejsza. To pozwala na zoptymalizowanie procesu obróbki maszynowej i sprzyja automatyzacji wytwarzania. Na Rys. 9 przedstawiono porównanie współczynników zmienności w poszczególnych analizowanych grupach. Widzimy, że ostrza charakteryzujące się najwyższą średnią trwałością (implantacja bez separacji) jednocześnie wykazują najwyższy współczynnik zmienności trwałości (0,82), co jest cechą zdecydowanie negatywną. Ostrza implantowane z separacją jonów obniżyły współczynnik zmienności do 0,49 w porównaniu do ostrzy z grupy kontrolnej (0,55), czyli wykazywały większą stabilność trwałości ostrza, co jest szczególnie ważne i świadczy o wyższej jakości tych ostrzy. Zatem z punktu widzenia jakości procesu modyfikacji ostrzy WC-Co implantacją jonów azotu nie można zrezygnować z separacji masowej jonów, gdyż brak separacji powoduje znaczący przyrost wartości trwałościowego współczynnika zmienności.



Rys. 9. Współczynnik zmienności trwałości ostrzy modyfikowanych i kontrolnych
Fig. 9. The coefficient of variation in lifetime of modified and control blades

Wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników można wyciągnąć następujące wnioski:

- Modyfikacja ostrzy WC-Co w procesie implantacji azotu ponad dwukrotnie zwiększyła ich trwałość podczas frezowania trójwarstwowej płyty wiórowej, niezależnie od rodzaju implantowanych jonów.
- Ostrza implantowane w procesie bez separacji masowej uzyskiwały najwyższą trwałość, ale jednocześnie była to grupa o najwyższym współczynniku zmienności trwałości.
- Separacja jonów azotu w procesie implantacji wpłynęła na obniżenie współczynnika zmienności trwałości modyfikowanych ostrzy WC-Co.

Podziękowania

Przedstawione badania zostały sfinansowane ze środków na naukę w latach 2017-2018, przyznanych na realizację międzynarodowego współfinansowanego projektu badawczego pt.: „Wpływ implantacji jonów azotu na właściwości kompozytów WC-Co stosowanych w obróbce materiałów drewnopochodnych” (grant Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr W83/HZDR/2017).

Część badań w powyższym projekcie zrealizowano przy wsparciu Centrum Helmholtza w Rossendorf k. Drezna (wniosek 17001078-ST).

Literatura

Barlak M., Wilkowski J., Werner Z., 2016: Ion implantation changes of tribological and corrosion resistance properties of materials used in wood industry. Ann. WULS-SGGW, For. and Wood Technol. 94, 19-27

Barlak M., Wilkowski J., Boruszewski P., Werner Z., Pałubicki B., 2017: Changes of functional properties of materials used in wood industry after ion implantation process. Annals of WULS - SGGW 97: 133-139

Kacew P.G., 1978: Kontrola narzędzi skrawających metodami statystycznymi. Wydawnictwo Naukowe Techniczne, s. 260

Kanazawa K., Chijiwa K., 1988: Characteristics of a nitrogen ion implanted cutting tool. Journal of the Metal Finishing Society of Japan 39 (10), 603-609. <https://doi.org/10.4139/sfj1950.39.603>

Krivosienko A.W., Nikolaev A.G., Li S., 2001: Техническое описание и инструкция по эксплуатации ионного источника "Титан-3" (Technical descriptions and operating instructions of the ion source "Titan-3"), *Российская Академия Наук - Институт Сильноточной Электроники*, Tomsk, in Russian.

Mikkelsen N.J., Straede C.A., 1992: Enhanced wear resistance of production tools and steel samples by implantation of nitrogen and carbon ions. Surface and Coatings Technology 51 152-156

Narocznyk J., Werner Z., Piekoszewski J., Szymczyk W., 2005: Effects of nitrogen implantation on lifetime of cutting tools made of SK5M tool steel. Vacuum 78(2-4), 229-233. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2005.01.031>

Onikura H., Ishimaru Y., Katsuki A., 1988: Cutting characteristics of nitrogen-ion-implanted drills. Journal of the Japan Society for Precision Engineering 54(4) 781-786. <https://doi.org/10.2493/jjspe.54.781>

Porankiewicz B., Chamot E., 2005: Tribochemical reactions of steel in cutting edge material during secondary wood products cutting. Tribology Letters 19(2), 73-82. <https://doi.org/10.1007/s11249-005-5082-7>

Raebel S., Worzala F.J., Conrad J.R., 1990: PSII nitrogen implanted M2 tool steel for wear resistance in wood machining tools. Surface Engineering 198-207. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0773-7_21

Sheikh-Ahmad J.Y., Bailey J.A., 1999: High-temperature wear of cemented tungsten carbide tools while machining particleboard and fiberboard. Journal of Wood Science 45(6), 445-455. <https://doi.org/10.1007/BF00538952>

Wilkowski J., Barlak M., 2018a: Trwałość ostrzy z węglika spiekanego podczas frezowania CNC płyt drewnopochodnych. Biuletyn Informacyjny OB-RPPD 3-4, 118-128. <https://doi.org/10.32086/biuletyn.2019.01>

Wilkowski J., Wilkowski J., Barlak M., Wachowicz J., Bottger R., Werner Z., 2018b: The wear curves of nitrogen-implanted WC-Co indexable knives during particleboard milling. Annals of WULS - SGGW 104, 395-399

Wilkowski J., Barlak M., Werner Z., Bottger R., Konarski P., Pisarek M., 2018c: The effect of nitrogen ion implantation on the properties of WC-Co composites used in wood-based materials machining. Poster presentation at Yucomat 2018 Conference, Herceg Novi, Montenegro, 3-7 September, 2018

Wilkowski J., Barlak M., Werner Z., Zagórski J., Czarniak P., Podziewski P., Szymanowski K., 2019: Lifetime improvement and the cutting forces in nitrogen-implanted drills during wood-based material machining. Wood and Fiber Science 51(2), 209-220. <https://doi.org/10.22382/wfs-2019-021>

Wykaz norm

PN-EN 310:1994 Płyty drewnopochodne - Oznaczenie modułu sprężystości przy zginaniu i wytrzymałości na zginanie.

PN-EN 323:1999 Płyty drewnopochodne - Oznaczenie gęstości.

ISO 3340: 1976 Płyty pilśniowe - Oznaczenie zawartości piasku.

Źródła internetowe

www.cerazit.com/en/products/wood-stone-working (dokument elektroniczny, stan na dzień 28.10.2019)

Artykuł recenzowany / Reviewed paper

Zgłoszony / Submitted: 08.11.2019

Opublikowany online / Published online: 16.12.2019