

Innowacyjne metody zwiększania trwałości narzędzi skrawających dla przemysłu meblarskiego

Modern methods of increasing lifetime of cutting tools for furniture industry

Marek Barlak^{a,*}, ORCID iD: 0000-0003-1416-7461
Jacek Wilkowski^b, ORCID iD: 0000-0001-5798-6761

^aNarodowe Centrum Badań Jądrowych Świerk, Zakład Technologii Plazmowych i Jonowych, ul. Andrzeja Sołtana 7, 05-400 Otwock, Polska

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

*Osoba do korespondencji: marek.barlak@ncbj.gov.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono główne materiały narzędziowe stosowane w przemyśle meblarskim i opisano metody poprawy trwałości narzędzi skrawających. W ramach metodyki badań własnych, przedstawiono przykłady modyfikowanych narzędzi, urządzenia wykorzystywane do ich modyfikacji i testowania oraz wybrane wyniki testów.

Abstract

The paper presents main tool materials used in furniture industry and describes methods of improving the lifetime of cutting tools. Examples of the modified tools, equipment for their modification and testing are presented as well as selected test results.

Słowa kluczowe: trwałość narzędzi skrawających, implantacja jonów, impulsy elektronowe, intensywne impulsy plazmowe

Keywords: lifetime of cutting tools, ion implantation, electron pulses, high-intensity plasma pulses

Wprowadzenie

Polska branża meblarska jest jednym z najbardziej dynamicznie rozwijających się działów przemysłu. Według Raportu KPMG - jednej z największych firm na świecie świadczących usługi w zakresie audytu, doradztwa podatkowego, doradztwa

gospodarczego i doradztwa finansowego, opracowanego na podstawie analizy danych uzyskanych od firm i instytucji badawczych (głównie Euromonitor International) oraz instytucji statystycznych (Eurostat i GUS), wartość produkcji sprzedanej branży meblarskiej w 2016 roku szacowana jest na około 42 mld złotych, a w ciągu najbliższych 5 lat przekroczy 50 mld złotych. Polska znajduje się w światowej czołówce zarówno producentów, jak i eksporterów mebli [KPMG 2017]. Ponadto, jak powiedział podczas II Ogólnopolskiego Kongresu Meblarskiego w ramach targów Drema, Furnica i Sofab w Poznaniu, Tomasz Wiktorski, menedżer Programu Polskie Meble, koordynowanego przez Polski Fundusz Rozwoju (PFR), do 2030 roku chcemy stać się numerem 1 w produkcji mebli w Europie. Oznacza to, że trzeba zwiększyć wartość produkcji sprzedanej o 150% i aby to się udało muszą zadziałać takie czynniki, jak np. wydajność produkcji i innowacyjność naszych produktów [Wiktorski 2017].

W związku ze skalą oraz tak dynamicznym rozwojem, branża meblarska potrzebuje dużych ilości narzędzi do obróbki materiałów drewnopochodnych, a problem poprawy ich trwałości bardzo dobrze wpisuje się w powyższe założenia.

Koszt narzędzi stanowi wysoki procent (nawet pow. 20%) całkowitych kosztów przy produkcji mebli w każdej wielkości przedsiębiorstwach, zwłaszcza w przypadku produkcji wysokojakościowej. W przypadku produkcji niskojakościowej lub obróbki pierwiastkowej koszty te nie przekraczają 3%. Autor publikacji [Półrolniczak 2010] wskazuje, że stosowanie ulepszonych narzędzi spowoduje zmniejszenie faktycznych i ukrytych strat, da możliwość zastosowania tańszych półfabrykatów, obniży koszty związane z narzędziami, a także umożliwi zwiększenie prędkości posuwu, co zwiększy wydajność produkcji.

Materiały narzędziowe dla przemysłu meblarskiego

W przemyśle meblarskim stosuje się głównie 3 rodzaje materiałów narzędziowych. Są to stale szybko tnące (ang. *high speed steels*), węgliki spiekane (w postaci noży skrawających do głowic lub wlutowywanych w korpusy stalowe (ang. *carbide tipped*)), a także narzędzi monolitycznych (ang. *solid carbides*)) oraz polikrystaliczny diament (ang. *PCD diamond*). Wady i zalety każdego z nich determinują jego użycie.

Zastosowanie narzędzi ze stali szybko tnącej generuje niższe koszty początkowe w porównaniu z innymi narzędziami. Wytrzymały korpus narzędzia ogranicza uszkodzenia podczas pracy na starych wrzecionach i frezarkach ręcznych. Ponadto dostępnych jest wiele nawet skomplikowanych geometrii ostrzy, a ostre krawędzie tnące pozwalają uzyskać zwiększone posuwy ręczne. Niestety, posuw automatyczny realizowany maszynowo musi być wolniejszy w porównaniu do innych materiałów narzędziowych, a narzędzia mogą podlegać drganiom o wysokiej amplitudzie powodującym radykalne zmniejszenie sztywności. Okres trwałości jest najkrótszy ze wszystkich materiałów narzędziowych. Wynika to z niskiej odporności na działanie tarcia, czyli podstawowego mechanizmu zużywania się ostrzy.

Węglik spiekane w postaci noży do głowic lub wlutowywane w korpusy stalowe charakteryzują się stosunkowo długim okresem trwałości w porównaniu do narzędzi stalowych, zwłaszcza w warunkach ręcznego frezowania (elektronarzędziami) materiałów twardych (trudnoobrabialnych). Niestety, narzędzia tego typu cechuje mniejsza sztywność, ograniczona jest liczba ich geometrii i należy stosować zmniejszone prędkości posuwu.

Te same węglik, ale stosowane w postaci narzędzi monolitycznych, o szerokiej gamie geometrii, charakteryzują się największą sztywnością, co przekłada się na najlepszą jakość wykończenia obrabianych materiałów. Narzędzia wykonane w tej technologii cechują się relatywnie długim okresem trwałości, który może być zwielokrotniony w procesie regeneracji. Bliskie maksymalnym prędkości posuwu (dla frezarek CNC - 25-30 m/min) wpływają na istotny wzrost wydajności obróbki (60-100%). Wadą są wysokie koszty początkowe oraz zwiększona liczba uszkodzeń, jeśli park maszynowy nie jest dobrze utrzymany.

Narzędzia wykonane z polikrystalicznego diamentu charakteryzują się najdłuższym okresem trwałości podczas obróbki materiałów twardych (trudnoobrabialnych). Stosowane geometrie umożliwiają obróbkę wybranych tworzyw sztucznych, drewna iglastego oraz aluminium. Początkowy koszt użytkowania diamentowych narzędzi jest bardzo wysoki. Narzędzia tego typu mają ograniczoną funkcjonalność w skrawaniu szczelinowym, a prędkości posuwu muszą być ograniczone (nawet o 50%) ze względu na stalowy korpus i znacznie mniej „finezyjną” geometrię w porównaniu do narzędzi stalowych i z węglików spiekanych [Onsrud Cutter LP 2017].

Metody poprawy trwałości narzędzi skrawających

Duże różnice pomiędzy właściwościami dostępnych materiałów narzędziowych wyznaczają przestrzeń działania nauki w celu poprawy cech istotnych z punktu widzenia wydajności produkcji. Należy do nich poprawa trwałości narzędzi. W praktyce można wyróżnić 3 główne drogi poprawy trwałości:

1. modyfikacja powierzchni narzędzi (bez nakładania dodatkowej warstwy),
2. nakładanie dodatkowej warstwy,
3. proces typu „dupleks”, stanowiący połączenie dwóch poprzednich procesów.

Każda z tych modyfikacji ma swoje wady i zalety i może być wykorzystywana w nieco innych warunkach.

W procesach modyfikacji powierzchni narzędzi bez nakładania dodatkowej warstwy, stosowane są głównie metody takie jak: azotowanie jonowe (ang. *Ion Nitriding*) [Beer i in. 2005], modyfikacja przez zanurzenie w płamie i implantację jonów (ang. *Plasma Immersion, Ion Implantation*) [Raebel i in. 1990], klasyczna implantacja jonów (ang. *Ion Implantation*) [Barlak i in. 2016], oddziaływanie impulsami plazmy gorącej (ang. *High Intensity Plasma Pulses*) [Nitychoruk 2017], wiązką elektronów (ang. *Pulse Electron Beam*) [Żurawski 2017], bądź laserem (ang. *Laser modification*) [Wilkowski i in. 2017].

Wszystkie wyżej wymienione procesy są procesami nierównowagowymi, prowadzącymi do wytworzenia struktur (a przez to - właściwości), niemożliwych do uzyskania innymi metodami. Fizyczna bądź fizyko-chemiczna zmiana warstwy wierzchniej modyfikowanego materiału (narzędzia) wywołuje zmianę np. jego właściwości mechanicznych.

Powyższe metody można podzielić na grupy zależnie od rodzaju depozycji do modyfikowanego materiału. W przypadku oddziaływania wiązką elektronową oraz laserem jest to depozycja energii (nagrzewanie, przetapianie), podczas gdy w przypadku azotowania jonowego i implantacji jonów, w procesach dominuje depozycja masy (domieszkowanie). Jeszcze inaczej jest w przypadku zastosowania impulsów gorącej plazmy - zależnie od przyjętego reżimu pracy może to być depozycja tylko energii bądź depozycja energii i masy.

W przypadku czysto fizycznej modyfikacji wykorzystywane jest zjawisko „kulowania” przy pomocy wiązek energetycznych (ang. *Shot Peening*), w którym fala uderzeniowa, wytwarzana w wyniku oddziaływania wiązki o dużej energii z modyfikowanym materiałem (ciśnienie wywierane na jego powierzchnię jest rzędu setek MPa), zastępuje klasyczne oddziaływanie mechaniczne [Shengzhi i in. 2013, Radziejewska i in. 2014].

W przypadku wprowadzania domieszki do modyfikowanego materiału, oprócz zmian fizycznych takich jak deformacja jego sieci krystalicznej czy zmiana parametrów tej sieci, następują zmiany jego składu chemicznego. Atomy wprowadzonej domieszki mogą np. utworzyć wydzielenia, bądź wejść w reakcje chemiczne z pierwiastkami modyfikowanego materiału i utworzyć nowe fazy.

Jak już wspomniano, implantacja jonów jest przykładem metody domieszkowania materiałów. W procesie implantacji wykorzystuje się wysoką energię kinetyczną jonów domieszki. Zjonizowane w źródle jonów atomy i 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 [Barlak 2016, Levintant-Zayonts 2014].

Klasyką stało się domieszkowanie narzędzi azotem, który w wyniku tworzenia azotków pierwiastków znajdujących się w podłożu modyfikowanego materiału (narzędzia), zwiększa jego twardość lub węglem, zmniejszającym współczynnik tarcia pomiędzy narzędziem, a obrabianym materiałem [Oñate i in. 1998]. Oprócz powyższych stosuje się domieszki innych pierwiastków, choć z różnych względów - w dużo mniejszym stopniu.

Oczywiście, przy zapewnieniu odpowiednich warunków w procesach domieszkowania, może również wystąpić wspomniane wcześniej zjawisko kulowania, którego efekty nałożą się na efekty zmian chemicznych.

Modyfikowany obszar materiału, wytworzony w procesie bez nakładania dodatkowej warstwy nie jest powłoką, a więc nie występuje tu problem zapewnienia dobrej adhezji warstwy z podłożem.

W przypadku każdej z wymienionych wcześniej metod, modyfikacja jest prowadzona w próżni, bądź w atmosferze ochronnej, co gwarantuje dużą czystość procesu.

Zazwyczaj, procesy modyfikacji prowadzone są w stosunkowo niskiej temperaturze (do kilkuset stopni Celsjusza), a w przypadku implantacji jonów, oddziaływania wiązką elektronów, plazmy, czy laserem, nawet w temperaturze pokojowej. Nie ma więc obawy o zmianę właściwości materiału bazowego (rdzenia) narzędzi.

Powyższe metody umożliwiają modyfikację warstwy wierzchniej narzędzi, bez zmiany ich kształtu i wymiarów, a zatem mogą być stosowane do gotowych narzędzi, np. dostępnych komercyjnie.

Wadą tej grupy metod jest stosunkowo cienka warstwa modyfikowana - rzędu co najwyżej pojedynczych mikrometrów, choć jak pokazują wyniki badań autorów niniejszej publikacji, wystarczająca, aby zwiększyć trwałość narzędzi o 100-200%.

Wytwarzanie na powierzchni narzędzia dodatkowej twardej powłoki odbywa się zazwyczaj w procesach fizycznego (ang. *Physical Vapour Deposition*) lub chemicznego (ang. *Chemical Vapour Deposition*) osadzania z fazy gazowej [Faga i Settineri 2006]. W przypadku różnych odmian PVD wykorzystuje się zjawiska fizyczne prowadzące do kondensacji i krystalizacji par materiału na obrabianym podłożu. Ze względu na występowanie tylko sił fizycznych, połączenie nakładanej powłoki z materiałem bazowym ma charakter adhezyjny i silnie zależy np. od czystości modyfikowanego materiału. Procesy PVD są prowadzone w stosunkowo niskiej temperaturze, a zatem ryzyko zmian chemicznych w strukturze materiału narzędzia jest dużo mniejsze niż w przypadku metod z grupy CVD. Te ostatnie wymagają temperatury rzędu 1000 i więcej stopni Celsjusza, aby substraty wprowadzone do komory reakcyjnej mogły wejść w reakcje chemiczne z pierwiastkami modyfikowanego podłoża.

Metody PVD i CVD są wykorzystywane do poprawy trwałości narzędzi dostępnych komercyjnie.

Głównym problemem w przypadku nakładania dodatkowych warstw jest wspomniany wcześniej problem zapewnienia wystarczającej adhezji. Może być on częściowo rozwiązany w przypadku modyfikacji typu „dupleks”, w której to, w pierwszym etapie materiał narzędzia jest modyfikowany powierzchniowo np. w procesie azotowania jonowego, a w drugim etapie - nakładana jest twarda warstwa [Narojczyk i in. 2009]. Utworzenie prawidłowej warstwy pośredniej pomiędzy podłożem a nakładaną warstwą umożliwia lepsze dopasowanie fizyko-chemicznych właściwości łączonych materiałów oraz kompensację naprężeń własnych w powstającym złączu. Niestety, dwuetapowość procesu zwiększa czasochłonność i energochłonność procesu, a zatem podnosi koszty.

Metodyka badań własnych

Zakład Technologii Plazmowych i Jonowych Narodowego Centrum Badań Jądrowych Świerk w Otwocku oraz Zakład Mechanizacji i Automatyzacji w Przemśle Drzewnym Wydziału Technologii Drewna SGGW w Warszawie, prowadzą wspólne badania nad poprawą trwałości narzędzi do obróbki materiałów drewnopochodnych.

W tym celu stosuje się m.in.:

- implantację jonów,
- impulsy elektronowe,
- impulsy gorącej plazmy.

W badaniach wykorzystywane są implantatory jonów (półprzemysłowy implantator jonów gazowych oraz implantator jonów typu MEVVA (ang. *Metal Vapor Vacuum Arc*), umożliwiający implantację jonów metali), generatory impulsów elektronowych i plazmy gorącej, użytkowane w Narodowym Centrum Badań Jądrowych Świerk. Urządzenia to zostały przedstawione na Rys. 1-4, a ich podstawowe parametry i szczegółowe opisy można znaleźć w publikacjach [Bugaev i in. 1994, Barlak i in. 2017, Barlak 2010].



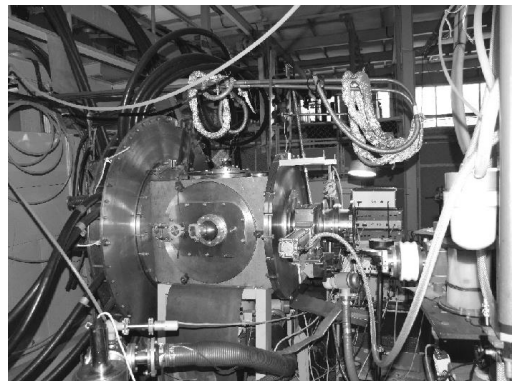
Rys. 1. Implantator jonów gazowych
Fig. 1. Gas ion implanter



Rys. 2. Implantator jonów typu MEVVA
Fig. 2. MEVVA type ion implanter



Rys. 3. Generator impulsów elektronowych
Fig. 3. Pulse electron beam device

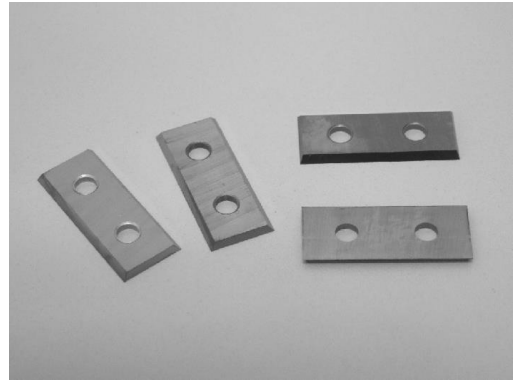


Rys. 4. Generator impulsów plazmowych
Fig. 4. Rod plasma injector

Rys. 5-6 przedstawiają fotografie przykładowych, dostępnych komercyjnie narzędzi wykorzystywanych w badaniach. Są to wiertła firmy Leitz, ze stali szybko tnącej o średnicy 10 mm i całkowitej długości 68 mm (Dowel Drills with 10 mm Shanks, n.d.) oraz noże WC-Co do głowic frezarskich firmy Faba o wymiarach 29,5×12,0×1,5 mm³.



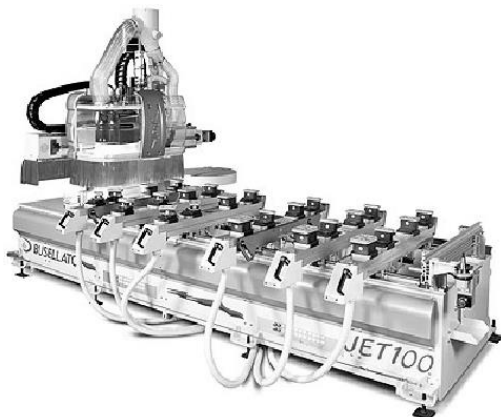
Rys. 5. Wiertła ze stali szybkotnącej Leitz
Fig. 5. High-speed steel drills



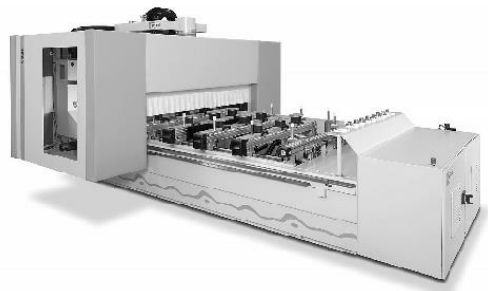
Rys. 6. Noże WC-Co do głowic frezarskich Faba
Fig. 6. WC-Co indexable knives for milling heads

Trwałość ostrzy badana jest na przemysłowych centrach obróbkowych (Rys. 7-8) przy stałych i zmiennych parametrach skrawania. Przykładowe stałe parametry dla głowic frezarskich z ostrzami WC-Co to: posuw na ząb $f_z = 0,15$ mm, prędkość obrotowa wrzeciona $n = 18$ tys. rpm. Zmienne parametry wykorzystuje się w celu optymalizacji procesu do warunków przemysłowych i wyznaczenia trwałości największej wydajności oraz tzw. ekonomicznej trwałości ostrza bezpośrednio związanej z ekonomiczną prędkością skrawania.

Trzeba pamiętać, że przy stosunkowo drogich narzędziach pracujących na tanich obrabiarkach, ekonomiczny okres trwałości ostrza jest wysoki, a ekonomiczna prędkość skrawania niska. W odwrotnym przypadku, przy drogich obrabiarkach jest przeciwnie, a ekonomiczny okres trwałości ostrza zbliża się do okresu największej wydajności.



Rys. 7. Centrum obróbkowe Busellato Jet 100
Fig. 7. CNC Busellato Jet 130 working center



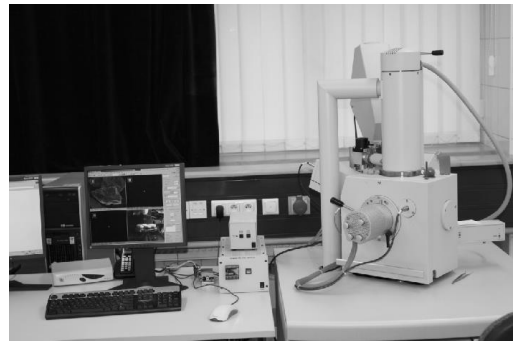
Rys. 8. Centrum obróbkowe Homag Venture 115M
Fig. 8. CNC Homag Venture 115M working center

Do badań trwałościowych narzędzi wykorzystuje się komercyjnie dostępne tworzywa drewnopochodne: trójwarstwowe płyty wiórowe oraz płyty pilśniowe MDF. Każda partia tych materiałów po zakupie w hurtowni jest badana pod względem podstawowych właściwości fizyko-mechanicznych. Określa się gęstość, wilgotność, wytrzymałość na zginanie statyczne, moduł sprężystości przy zginaniu statycznym, itp., oraz dodatkowo wyznacza się zawartość substancji mineralnych w płytach, jako czynnika który może mieć wpływ na tęgę i charakter zużywania się ostrzy narzędzi skrawających.

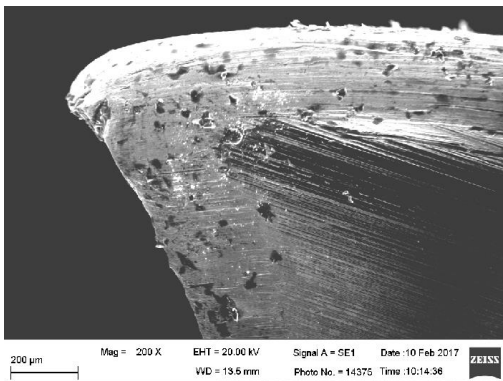
Po kolejnych cyklach tępienia ostrza podlegają pomiarom mikroskopowym w celu określenia bezpośrednich wskaźników zużycia narzędzia. Na tym etapie wykorzystuje się mikroskopy narzędziowe (Rys. 9), jak również elektronowe mikroskopy skaningowe - SEM (ang. *Scanning Electron Microscope*) (Rys. 10). Chodzi o to, aby w możliwie dokładny i pewny sposób określić charakter zużycia, który dla różnych typów narzędzi i rodzajów obróbki może być wyjątkowy i niepowtarzalny (Rys. 11-12).



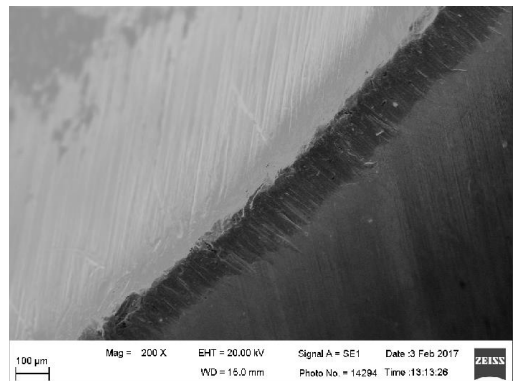
Rys. 9. Mikroskop narzędziowy Mitutoyo TM-505
Fig. 9. Workshop microscope Mitutoyo TM-505



Rys. 10. Mikroskop SEM Quanta 200
Fig. 10. SEM microscope Quanta 200



Rys. 11. Zużycie naroża wiertła HSS (zdjęcie SEM)
Fig. 11. Corner wear of HSS drill (SEM)

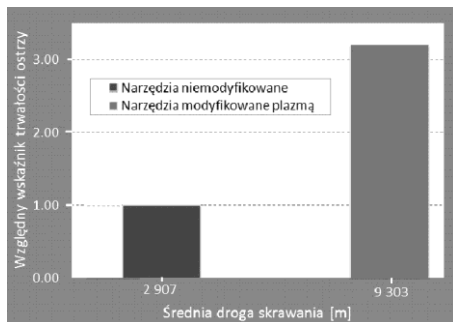


Rys. 12. Zużycie krawędzi tnącej WC-Co (zdjęcie SEM)
Fig. 12. WC-Co cutting edge wear (SEM)

Przykładowe wyniki badań

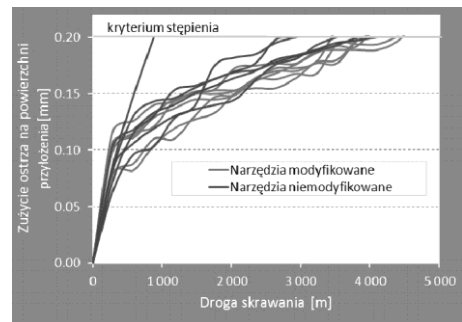
Na rys. 13-14 przedstawiono wyniki badań trwałościowych ostrzy WC-Co wykonanych w laboratorium WTD SGGW. Badaniom zostały poddane noże do głowic frezarskich modyfikowane w generatorze intensywnych impulsów plazmowych w laboratorium NCBJ w ilości 6 szt. W celach porównawczych, równocześnie badano ostrza niemodyfikowane (6 szt.). Frezowano trójwarstwową płytę wiórową o średniej gęstości 740 kg/m^3 ze stałymi parametrami skrawania (posuw na ząb $\Delta z = 0,15 \text{ mm}$, prędkość obrotowa $n = 18 \text{ tys. obr./min}$). Zaobserwowano znaczący przyrost względnego wskaźnika trwałości ostrzy, określonego na podstawie średniej drogi skrawania sześciu ostrzy w poszczególnych grupach narzędzi (modyfikowanych i niemodyfikowanych). Wartość wskaźnika ponad 3 oznacza ponad trzykrotne zwiększenie trwałości narzędzi poddanych modyfikacji (Rys. 13). Jeszcze ciekawsze wyniki przedstawia rys. 14. Proces modyfikacji prowadzi nie tylko do wydłużenia drogi skrawania kolejnych ostrzy, ale również do wyrównania przebiegu krzywych zużycia, co jest równie cenną cechą z punktu widzenia zastosowań przemysłowych jak podwyższenie trwałości. Na przewidywalnie zachowujących się w trakcie pracy narzędziach można budować zautomatyzowane technologie obróbki tworzyw drzewnych.

Dopiero te badania pokazują jaką perspektywę rozwoju posiadają omawiane w tym artykule innowacyjne metody modyfikacji narzędzi.



Rys. 13. Względny wskaźnik trwałości ostrzy WC-Co

Fig. 13. Relative index of WC-Co tools life



Rys. 14. Krzywe zużycia ostrzy WC-Co

Fig. 14. Wear curves of WC-Co tools

Perspektywa rozwoju

Obecnie, badania nad zwiększeniem trwałości narzędzi do obróbki materiałów drewnopochodnych koncentrują się głównie na narzędziach wykonanych z węglików spiekanych WC-Co, ze względu na to, że cena takich narzędzi w porównaniu z ceną narzędzi z diamentu polikrystalicznego jest zdecydowanie niższa. Ponadto ten materiał w przeciwieństwie do węglików ma ograniczone zastosowanie w niektórych sposobach obróbki, ze względu na niewielkie możliwości dostosowania geometrii i niską odporność uderzeniową, a ta cecha może mieć decydujące znaczenie, przy tendencji obserwowanej

w przemyśle - ciągłego zwiększania wydajności produkcji, a co za tym idzie podwyższania prędkości skrawania. Cały czas wysoki potencjał materiału WC-Co sprawia, że ma on pozycję dominującą na rynku i jeszcze długo będzie wykorzystywany w praktyce przemysłowej.

Potwierdzeniem powyższych stwierdzeń jest szerokie zainteresowanie pracami badawczymi prowadzonymi przez wymienione wcześniej jednostki: NCBJ i WTD SGGW. Zainteresowanie to nie ogranicza się do firm krajowych widzących w tych badaniach swoją perspektywę rozwoju, ale wyniki prac zauważono również poza granicami Polski. Dowodem dużej wartości tych wyników jest grant badawczy przyznany autorom projektu przez niemiecki instytut Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf w Dreźnie. Jedno z zadań badawczych jednostki tego instytutu - Ion Beam Center na lata 2017-18, zatytułowane jest „The effect of nitrogen ion implantation on the properties of WC-Co composites used in wood-based materials machining”, co idealnie wpisuje się w omawianą problematykę.

Literatura

Barlak M., 2010: Intensywne impulsy plazmowe w procesach poprawy zwilżalności ceramiki. Instytut Problemów Jądrowych im. Andrzeja Sołtana, Świerk

Barlak M., Wilkowski J., Werner Z., 2016: Ion implantation changes of tribological and corrosion resistance properties of materials used in wood industry. Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Forestry and Wood Technology 94: 19-27

Barlak M., Wilkowski J., Boruszewski P., Zagórski J., Werner Z., 2017: Influence of electron pulses on roughness and wettability of beech wood surface. Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Forestry and Wood Technology 98: 16-19

Beer P., Rudnicki J., Bugliosi S., Sokołowska A. Wnukowski, E., 2005: Low temperature ion nitriding of the cutting knives made of HSS. Surface and Coatings Technology, 200: 146-148

Bugaev S.P., Oks E.M., Shchanin P.M., Yushkov G.Yu., 1994: „TITAN”, a source of gas and metal ions based on a contracted discharge and vacuum arc. Russian Physics Journal 37: 245-254

Faga M.G., Settineri L., 2006: Innovative anti-wear coatings on cutting tools for wood machining. Surface and Coatings Technology 201 3002-3007

Levintant-Zayonts N., 2009: Wpływ implantacji jonowej na własności materiałów z pamięcią kształtu typu NiTi. Rozprawa doktorska IPPT PAN

Narajczyk J., Werner Z., Barlak M., Morozow D., 2009: The effect of Ti preimplantation on the properties of TiN coatings on HS 6-5-2 high-speed steel. Vacuum 83: S228-S230

Nitychoruk K., 2017: Wpływ plazmowej modyfikacji powierzchni ostrzy frezów do obróbki materiałów drzewnych na ich budowę mikrostrukturalną oraz trwałość eksploatacyjną. Praca inżynierska SGGW

Oñate J.I., Alonso F., García A., 1998: Improvement of tribological properties by ion implantation. Thin Solid Films 317: 471-476

Półrolniczak A., 2010: W poszukiwaniu narzędzi idealnych. Warstwy przeciwzużyciowe dla narzędzi do obróbki drewna na bazie związków tytanu, glinu i chromu - ich przydatność, możliwości zastosowania oraz ekonomiczność. *Kurier Drzewny* 7-8: 18-19

Radziejewska J., Marczak J., Hoffman J., Sarzyński A., Strzelec M., 2014: Zastosowanie laserowo indukowanych fal uderzeniowych do badania dynamicznych właściwości materiałów. *Inżynieria Materiałowa* 6/2014: 544-547

Raebel S., Worzala F., Conrad J., 1990: PSII nitrogen implanted M2 tool steel for wear resistance in wood machining tools. S. Shaker, ed., *Surface Engineering*, 1st ed. London: Elsevier Science Publishers Ltd, 198-207

Shengzhi Hao, Yang Xu, Yue Zhang, Limin Zhao, 2013: Improvement of surface microhardness and wear resistance of WC/Co hard alloy by high current pulsed electron beam irradiation. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 41 553-557

Wilkowski J., Kołodziejczak P., Barlak M., Czarniak P., Werner Z., Staszkievicz B., 2017: Effect of laser modification of WC-Co tool-life during particleboards milling. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Forestry and Wood Technology* 98: 148-152

Żurawski Ł., 2017: Wpływ elektronowej modyfikacji powierzchni ostrzy frezów do obróbki materiałów drzewnych na ich budowę mikrostrukturalną i trwałość eksploatacyjną. Praca inżynierska SGGW

Źródła internetowe

KPMG, 2017: Rynek meblarski w Polsce. <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/pl/pdf/2017/06/pl-Raport-KPMG-Rynek-meblarski-w-Polsce-2017.pdf>, (dokument elektroniczny, stan na dzień 27.09.2017)

Onsrud Cutter LP, 2017: Production Routing Guide. <http://www.onsrud.com/files/pdf/LMT-Onsrud-CNC-Prod-Routing-Guide.pdf>, (dokument elektroniczny, stan na dzień 27.09.2017)

Wiktorski T., 2017: Jak zostać numerem 1 w Europie? http://www.drema.pl/pl/news/jak_zostac_numerem_1_w_europie-video/ (dokument elektroniczny, stan na dzień 27.09.2017)

Artykuł recenzowany / Reviewed paper

Opublikowany online / Published online: 16.12.2019