



Wpływ rodzaju modyfikowanej powierzchni ostrza na okres trwałości narzędzi WC-Co wykorzystywanych w obróbce materiałów drzewnych

The influence of the kind of the modified tool cutting surface on the life-time of WC-Co tools used in wood materials machining

Marek Barlak^{a,*}, ORCID: 0000-0003-1416-7461
Jacek Wilkowski^b, ORCID: 0000-0001-5798-6761
Zbigniew Werner^a, ORCID: 0000-0003-1172-0268
Bogdan Staszkiwicz^a, ORCID: 0000-0002-7741-4362
Jerzy Zagórski^a, ORCID: 0000-0001-6311-947X
Konrad Ziółkowski^b,

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

^bSzkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Instytut Nauk Drzewnych i Meblarstwa, Katedra Mechanicznej Obróbki Drewna, ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa, Polska

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

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki trwałościowych badań wymiennych noży frezarskich WC-Co wykorzystywanych w obróbce materiałów drzewnych, modyfikowanych impulsami elektronowymi. Modyfikacji podlegała powierzchnia przyłożenia i/lub powierzchnia natarcia ostrzy. Okres trwałości modyfikowanych narzędzi był dłuższy od okresu trwałości narzędzi nie poddanych modyfikacji. Największy wzrost trwałości zaobserwowano w przypadku modyfikacji powierzchni przyłożenia, a najmniejszy - w przypadku modyfikacji powierzchni przyłożenia oraz powierzchni natarcia.

Abstract

The paper presents the results of tool life-time tests of WC-Co indexable milling knives used in machining of wood materials, treated with electron pulses. The clearance surfaces and/or rake surfaces were modified. The life-time of the modified tools was longer than the life-time of the non-modified tools. The highest increase of the tool life was observed in the

case of the modification of the clearance surface, and the smallest in the case of the modification of the clearance and the rake surfaces.

Słowa kluczowe: węgiel spiekany WC-Co, impulsy elektronowe, obróbka materiałów drzewnych, powierzchnia przyłożenia, powierzchnia natarcia

Keywords: WC-Co cemented carbide, electron pulses, wood materials machining, clearance surface, rake surface

Wprowadzenie

Materiały narzędziowe WC-Co to połączenie twardych i kruchych węglików WC oraz stosunkowo miękkiego i ciągliwego metalicznego spoiwa Co. W wyniku połączenia tych materiałów otrzymuje się kilka korzystnych cech materiałowych, takich jak wytrzymałość, twardość, sztywność, odporność na kruche pękanie, czy odporność na zużycie w temperaturze do 400°C (Milman i in. 1997, Sheikh-Ahmad i Bailey 1999, Pirso i in. 2004, Bonny i in. 2004, Choi i in. 2010, Olovsjö i in. 2013). Jednakże, trwałość narzędzi węglkowych jest wciąż niewystarczająca. Istnieje kilka metod ulepszenia właściwości skrawnych ostrza (Barlak i in. 2016), np. modyfikacja powierzchni impulsami elektronowymi (Żurawski 2017). Modyfikowany obszar materiału nie jest nałożoną warstwą, dlatego nie występuje problem adhezji warstwy do podłoża. Nie pojawia się też problem zmiany wymiarów modyfikowanego elementu, a w związku z tym, modyfikację powierzchni impulsami elektronowymi można zastosować również w przypadku gotowych narzędzi.

Celem niniejszej pracy było zbadanie efektów modyfikacji w zależności od rodzaju modyfikowanej powierzchni, tj. powierzchni przyłożenia, powierzchni natarcia lub obydwu wymienionych powierzchni.

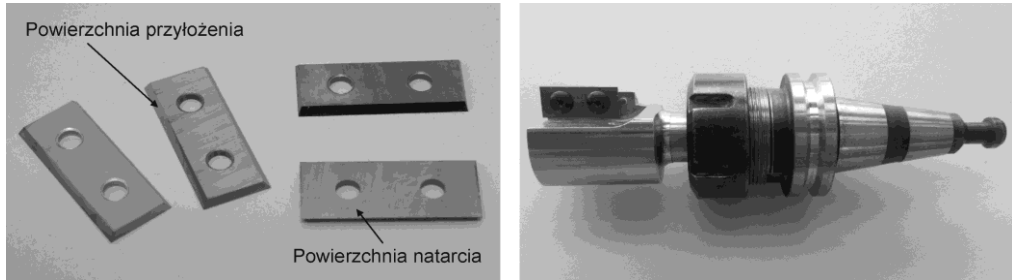
Modyfikacja powierzchni impulsami elektronowymi została wybrana ze względu na wcześniejsze pozytywne doświadczenia autorów niniejszej publikacji w tym zakresie (Żurawski 2017).

Część przedstawionych w publikacji wyników pochodzi z pracy inżynierskiej jednego ze współautorów (Ziółkowski 2018).

Materiały i metodyka badań

W badaniach wykorzystano dostępne komercyjnie, wymienne noże WC-Co typu KCR08 (Ceratizit, Reutte, Austria), stosowane do mechanicznej obróbki materiałów drzewnych, o wymiarach: 29,5×12×1,5 mm³, o składzie chemicznym: 90,86% wolframu, 5,94% węgla i 3,2% kobaltu wagowo, tj. 47,4% wolframu, 47,4% węgla i 5,2% kobaltu atomowo i o gęstości 15,2 g/cm³. Deklarowana przez producenta wielkość ziarna WC była w zakresie 0,5-0,8 μm, twardość materiału noży: 1920 HV10, 1885 HV30 i 93,4 HRA, a wytrzymałość na zginanie: 2300 MPa, tj. 334 P.S.I. (CERATIZIT).

Zdjęcie badanych noży przedstawiono po lewej stronie Rys. 1. Dodatkowo wskazano powierzchnię przyłożenia i natarcia wybranych ostrzy. Po prawej stronie Rys. 1 pokazano jednoostrzową głowicę frezarską typu FTS.07L4043.01 (Faba S.A. Baboszewo, Poland), o średnicy 40 mm, wykorzystywaną w testach trwałościowych.



Rys. 1. Wymienne noże WC-Co do obróbki materiałów drzewnych (po lewej) i jednoostrzowa głowica frezarska stosowana w testach trwałościowych (po prawej)

Fig. 1. WC-Co indexable knives for wood-based material machining (left) and one edge milling head used in the durability tests (right)

Modyfikacje powierzchni przyłożenia i/lub powierzchni natarcia były prowadzone przy użyciu źródła silnoprądowych wiązek elektronów RITM-2M (Microsplav, Tomsk, Rosja). Jest to urządzenie naukowo-badawcze w postaci generatora nierelatywistycznych silnoprądowych wiązek elektronów, przeznaczone do prowadzenia badań w zakresie fizyki oddziaływania skoncentrowanych strumieni energii z ciałem stałym (Barlak i in. 2017, Zhou i in. 2015, Jianiun i in. 2013, IHCE SB RAS).

Powierzchnie przyłożenia i/lub powierzchnie natarcia noży WC-Co były modyfikowane pojedynczymi impulsami elektronowymi. Wyniki prowadzonych prac (Żurawski 2017) wskazują na to, że największą trwałość modyfikowanych narzędzi uzyskuje się dla pojedynczych impulsów elektronowych, o długości 2 μ s i gęstości energii z zakresu od 3,49 do 4,74 J/cm² (taki rozrzut gęstości energii impulsów nie wpływa znacząco na wyniki trwałości). Główne parametry procesów modyfikacji zostały przedstawione bardziej szczegółowo w Tabeli 1.

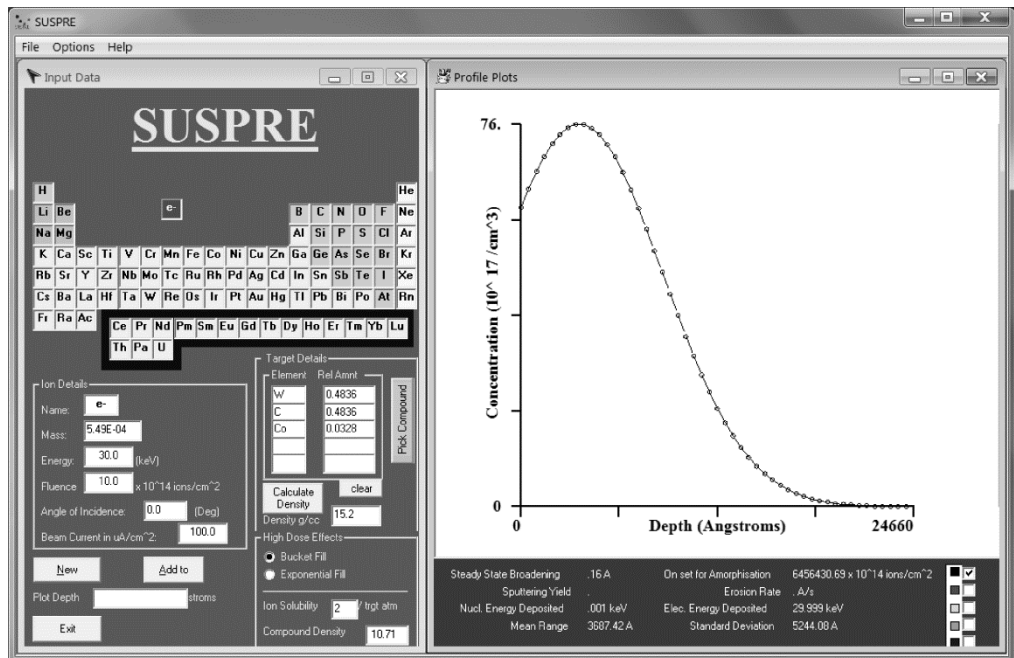
Obliczona z użyciem programu SUSPRE (SUSPRE) wartość zasięgu elektronów (Starodubtsev i Romanov 1962) w materiale W-C-Co o gęstości 15,2 g/cm³, dla napięcia przyspieszającego 30 kV (energia elektronów 30 keV) wynosi ok. 2 μ m - Rys. 2, tak więc można przyjąć, że grubość modyfikowanego obszaru była zbliżona do 2 μ m.

W następnym etapie, noże niemodyfikowane (kontrolne) oraz noże modyfikowane poddano testom trwałościowym. W testach wykorzystano surową, trójwarstwową płytę wiórową (Pfleiderer, Grajewo, Polska), o grubości 18 mm, która jest standardowym materiałem konstrukcyjnym, powszechnie stosowanym w przemyśle meblarskim.

Właściwości płyty wiórowej przedstawiono w Tabeli 2, a profil jej gęstości - na Rys. 3. Z płyty wiórowej wykonano formatki do testów, o wymiarach 700×330 mm².

Tabela 1. Główne parametry procesów modyfikacji impulsami elektronowymi
Table 1. Main parameters of the pulse electron modification processes

Parametr	Modyfikowana powierzchnia		
	Przyłożenia	Natarcia	Przyłożenia + Natarcia
Liczba impulsów elektronowych	1	1	1 + 1
Długość impulsów elektronowych (μs)	2	2	2 + 2
Gęstość energii impulsów elektronowych (J/cm^2)	4,3	3,49	4,49 + 4,74
Napięcie przyspieszające (kV)	30	30	30 + 30
Czas opóźnienia wyładowania względem początku przepływu prądu w solenoidzie (2...7 ms)	5	5	5 + 5
Czas opóźnienia startu generatora impulsów wysokonapięciowych względem początku impulsu prądu wyładowania odbiciowego (4...200 μs)	10	10	10 + 10
Rodzaj gazu	Ar	Ar	Ar
Ciśnienie gazu (Pa)	0,11	0,11	0,11 + 0,11



Rys. 2. Interfejs graficzny programu SUSPRE wraz z wynikami modelowania zasięgu elektronów o energii 30 keV

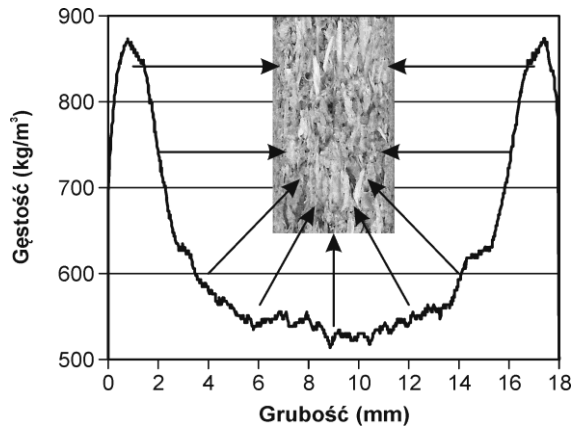
Fig. 2. The graphical user interface of SUSPRE code with the results of the modeling of the 30 keV electron's range

Tabela 2. Wybrane fizyczne i mechaniczne właściwości trójwarstwowej płyty wiórowej
Table 2. The selected physical and mechanical properties of the tested three-layer particleboard

Material	Gęstość (kg/m ³)	Wytrzymałość na zginanie statyczne, MOR (MPa)	Moduł sprężystości przy zginaniu statycznym, MOE (MPa)
Trójwarstwowa płyta wiórowa	649	8,68	2212

Testy trwałościowe narzędzi przeprowadzono z użyciem centrum obróbczego Busellato Jet 130 (Casadei-Busellato, Thiene, Włochy). Zastosowano następujące parametry skrawania: posuw na ostrze: $f_z = 0,15$ mm, prędkość posuwu narzędzia: $v_f = 2,7$ m/min., prędkość obrotowa wrzeciona/narzędzia: $n = 18000$ obr./min., liczba ostrzy skrawających $z = 1$, głębokość skrawania: $e = 6$ mm.

Droga posuwu wynosiła 0,7 m, co przekładało się na drogę skrawania równą 293,77 m. Kryterium stępienia dla wszystkich ostrzy ustalono dla bezpośredniego wskaźnika zużycia ostrza, tzw. maksymalnego pasma starcia mierzonego na powierzchni przyłożenia (VB_{max}). Kryterium to wynosiło 0,2 mm. Jest to wartość zalecana przez producentów narzędzi jako optymalna do późniejszej regeneracji ostrza w procesie ostrzenia. Po osiągnięciu tej wartości nóż uznawano za stępiony, czyli nie nadający się do dalszej pracy. Pomiar zużycia ostrza wykonywano po każdym cyklu tępienia przy użyciu standardowego mikroskopu narzędziowego. W każdej grupie narzędzi, testom poddano 6 ostrzy.



Rys. 3. Profil gęstości trójwarstwowej płyty wiórowej
Fig. 3. The density profile of the three-layer particleboard

Zarejestrowane krzywe zużycia były podstawą do wyznaczenia minimalnej, maksymalnej i średniej wartości drogi skrawania dla wszystkich grup narzędzi. Dodatkowo dla wartości średniej obliczono wartości odchylenia standardowego i błędu standardowego.

W celu porównania jakości poszczególnych grup narzędzi, wyznaczono wartości względnego wskaźnika trwałości ostrzy *RI* (ang. *relative index of tool life*), współczynnika

zmienności trwałości ostrzy CV (ang. *coefficient of variation of tool life*) oraz wskaźnika trwałościowej jakości modyfikacji ostrzy QI (ang. *quality index of tool life*) (Wilkowski i in. 2019, Wilkowski i in. 2020).

Względny wskaźnik trwałości ostrzy dla narzędzi modyfikowanych, wyliczono 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 niemodyfikowanych w (m).

Wyniki odniesiono do wyniku uzyskanego dla ostrzy niemodyfikowanych, dla których względny wskaźnik trwałości ostrzy $RI = 1$.

Współczynnik zmienności trwałości ostrzy dla narzędzi niemodyfikowanych oraz poszczególnych przypadków modyfikacji wyliczono 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); $L = L_m$ dla ostrzy modyfikowanych i $L = L_k$ dla ostrzy niemodyfikowanych.

Wskaźnik trwałościowej jakości modyfikacji ostrzy wyliczono wg wzoru:

$$QI = RI/CV \quad (3)$$

gdzie:

QI - wskaźnik trwałościowej jakości modyfikacji,

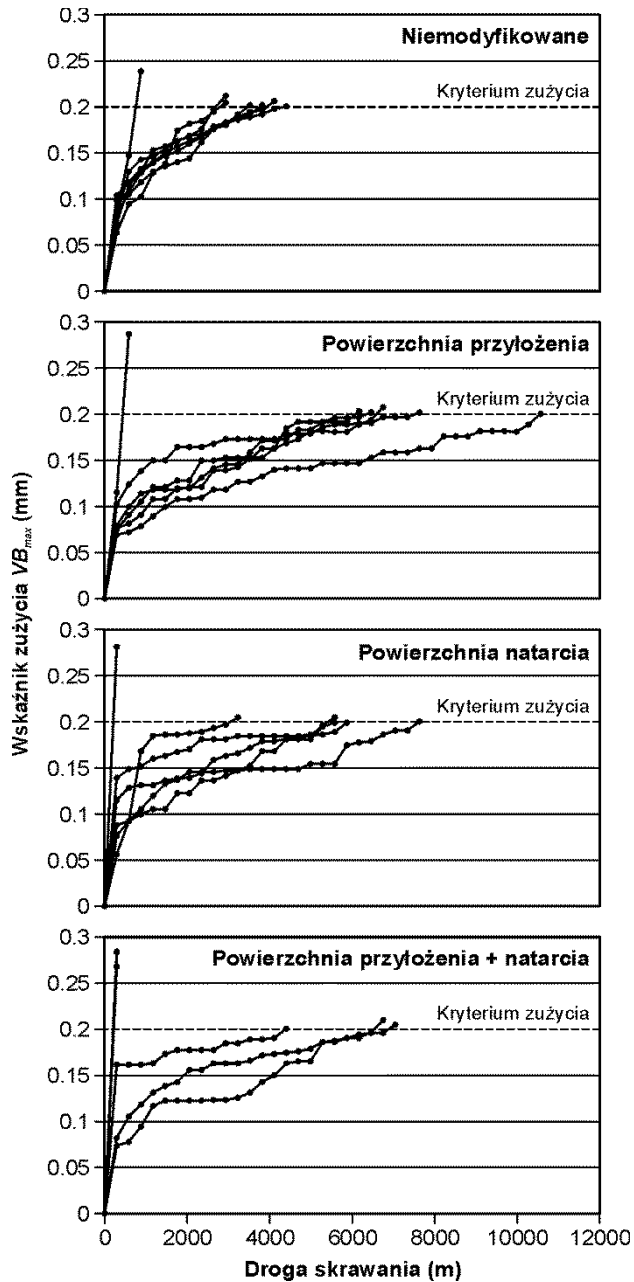
RI - względny wskaźnik trwałości ostrzy,

CV - współczynnik zmienności trwałości ostrzy.

Wyniki badań i analiza

Na Rys. 4 przedstawiono krzywe zużycia dla noży niemodyfikowanych oraz dla wszystkich przypadków modyfikacji, tj. modyfikacji powierzchni przyłożenia, modyfikacji powierzchni natarcia oraz modyfikacji obydwu powierzchni tego samego ostrza. Łatwo zauważyć zwiększenie rozrzutu krzywych dla wszystkich przypadków modyfikacji. Ponadto,

w każdym zestawieniu występują przypadki gwałtownego wykruszenia ostrza, przekraczającego kryterium stępienia w początkowych cyklach zużycia.



Rys. 4. Krzywe zużycia dla wymiennych noży WC-Co
Fig. 4. The wear curves for the tested WC-Co indexable knives

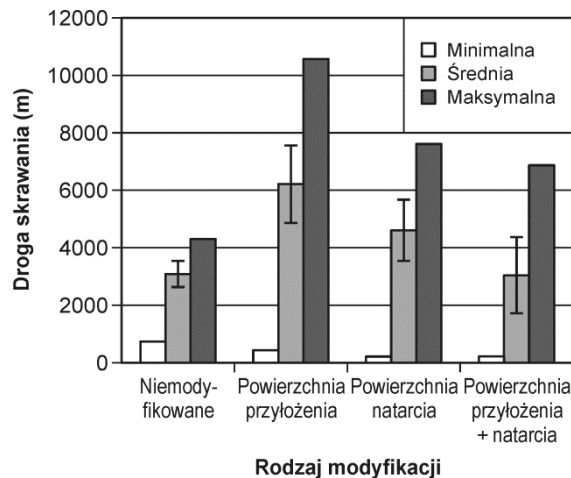
Okresy trwałości ostrza wyrażone średnią, minimalną i maksymalną drogą skrawania do osiągnięcia kryterium stępienia, przedstawiono w sposób graficzny na Rys. 5. Do obliczeń tych wartości, brano pod uwagę wszystkie wyniki zużycia ostrzy, w tym również przypadki gwałtownego ich wykruszenia, ze względu na to, że ten charakter zużycia był istotny w procesie zużywania ostrzy WC-Co.

Minimalne wartości dla ostrzy niemodyfikowanych, ostrzy z modyfikacją powierzchni przyłożenia, powierzchni natarcia i obydwu modyfikowanych powierzchni wynosiły w zaokrągleniu do pełnych metrów, odpowiednio: 752, 438, 208 i 205 m. Różnica pomiędzy skrajnymi wartościami jest ponad 3,5-krotna.

Maksymalne wartości drogi skrawania wynosiły odpowiednio: 4309, 10549, 7609 i 6855 m, a różnica pomiędzy skrajnymi, tj. dla narzędzia niemodyfikowanego i narzędzia z modyfikowaną powierzchnią natarcia - blisko 2,5-krotna.

Wartości średnie drogi skrawania wynosiły odpowiednio jak wyżej: 3088, 6216, 4610 i 3058 m. Największy wzrost nastąpił dla przypadku modyfikacji powierzchni przyłożenia. Praktycznie brak jest zmian w przypadku modyfikacji obydwu powierzchni jednego narzędzia.

Wartości odchylenia standardowego dla średniej drogi skrawania wynosiły odpowiednio: 1185, 3280, 2614 i 3232 m. Wartości błędu standardowego dla średniej drogi skrawania to odpowiednio: 448, 1339, 1067 i 1320 m. Niestety, wartość ta wzrosła od ok. 2,4-krotnie do ok. 3-krotnie w stosunku do przypadku narzędzia niemodyfikowanego.



Rys. 5. Minimalne, średnie i maksymalne wartości drogi skrawania dla wszystkich rodzajów modyfikacji; dla wartości średnich pokazano dodatkowo wartości błędu standardowego w postaci słupków błędu

Fig. 5. The minimum, the average, and the maximum values of the cutting length for all types of the modification; for average values, the values of the standard error in the form of error bars are additionally shown

W Tabeli 3 przedstawiono wyznaczone wartości względnego wskaźnika trwałości ostrzy, współczynnika zmienności trwałości ostrzy i wskaźnika trwałościowej jakości modyfikacji ostrzy.

Tabela 3. Wartości względnego wskaźnika trwałości ostrzy, współczynnika zmienności trwałości ostrzy oraz wskaźnika trwałościowej jakości modyfikacji ostrzy dla wszystkich grup narzędzi
Table 3. The values of the relative index of tool life, the coefficient of variation of tool life and the quality index of tool life for all tool groups

Wskaźnik	Niemodyfikowane	Powierzchnia przyłożenia	Powierzchnia natarcia	Powierzchnia przyłożenia + natarcia
Względny wskaźnik trwałości ostrzy, Rl	1,00	2,01	1,49	0,99
Współczynnik zmienności trwałości ostrzy, CV	0,38	0,53	0,57	1,06
Wskaźnik trwałościowej jakości modyfikacji ostrzy, Ql	2,61	3,81	2,63	0,94

Modyfikacja ostrzy impulsami elektronowymi od strony powierzchni przyłożenia spowodowała najwyższy, ponad 2-krotny wzrost trwałości w odniesieniu do ostrzy niemodyfikowanych ($Rl = 2,01$). Jednocześnie współczynnik zmienności trwałości CV w tej grupie wykazał stosunkowo niewielki wzrost, co w efekcie przełożyło się na najwyższą wartość wskaźnika trwałościowej jakości modyfikacji ostrzy Ql (Tabela 3). Wskaźnik ten w syntetyczny sposób opisuje jakość przeprowadzonej modyfikacji z uwzględnieniem względnej trwałości w odniesieniu do narzędzi kontrolnych oraz zmienności trwałości uzyskiwanej w danym procesie modyfikacji. Z punktu widzenia użyteczności przemysłowej procesu poprawy trwałości ostrzy skrawających, istotny jest nie tylko jak największy względny wzrost trwałości, ale co również niezbędne, szczególnie w warunkach zautomatyzowanej produkcji, niski poziom zmienności trwałości. Takie wartości wskaźników pozwalają na najefektywniejsze, z punktu widzenia wydajnościowego i kosztowego, wykorzystanie linii produkcyjnych, czy zautomatyzowanych gniazd obróbkowych.

Wskaźnik trwałościowej jakości modyfikacji ostrzy od strony powierzchni natarcia jest porównywalny z grupą ostrzy niemodyfikowanych, natomiast wartość uzyskana dla modyfikacji od obu powierzchni ostrza skrawającego jest zdecydowanie niższa ($Ql = 0,94$), co w obu przypadkach wyklucza praktyczne wykorzystanie tych wariantów modyfikacji (Tabela 3).

Szukając przyczyn obniżenia trwałości i zwiększenia zmienności trwałości narzędzi modyfikowanych impulsami elektronowymi od obu powierzchni ostrza skrawającego należy niewątpliwie zwrócić uwagę, że ta modyfikacja zwiększała prawdopodobieństwo wystąpienia katastroficznego stępienia ostrza (Ziółkowski 2018). Zatem mogła powodować zwiększenie kruchości warstw powierzchniowych materiału ostrza, np. w wyniku wytopienia kobaltowego spoiwa. W końcu impuls elektronowy jest wysokoenergetyczny i powoduje

wysokotemperaturowe zmiany topografii powierzchni ostrza, co potwierdzono pomiarem chropowatości powierzchni po tego rodzaju modyfikacji (Żurawski 2017).

Wnioski

Podsumowując uzyskane wyniki można stwierdzić, że pod względem poprawy trwałości narzędzi WC-Co do obróbki materiałów drzewnych oraz z uwzględnieniem zmienności ich trwałości, najbardziej korzystną jest modyfikacja impulsami elektronowymi od strony powierzchni przyłożenia ostrza. W tym przypadku obserwuje się ponad 2-krotny wzrost średniej trwałości ostrzy, a wskaźnik trwałościowej jakości modyfikacji uzyskał najwyższą wartość ($QI = 3,81$). Przy tych parametrach procesu, nieuzasadnione jest modyfikowanie obydwu powierzchni ostrza skrawającego (powierzchni przyłożenia i natarcia). Taka modyfikacja jest przynajmniej 2-krotnie dłuższa, a więc i kosztowniejsza.

Literatura

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 Science - 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 Science - SGGW, Forestry and Wood Technology* 98, 16-19.

Bonny K., De Baets P., Perez Y., Vleugels J., Lauwers B., 2010: Friction and wear characteristics of WC-Co cemented carbides in dry reciprocating sliding contact. *Wear* 268, 1504-1517. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.02.029>

Choi S.-H., Kang S.-D., Kwon Y.S., Lim S.G., Cho K.K., Ahn I.-S., 2010: The effect of sintering conditions on the properties of WC-10wt%Co PIM compacts. *Research on Chemical Intermediates* 36, 743-748. <https://doi.org/10.1007/s11164-010-0176-8>

Jianjun H., Hongbin X., Xiaobo L., 2013: Experimental study of gear bending fatigue strength with pulsed electron beam after grinding tooth surface. *The Proceedings of the Symposium on Motion and Power Transmission* 301-305. <https://doi.org/10.1299/jsmemtp.2013.301>

Milman Yu.V., Chugunova S., Goncharuck V., Luyckx S., Northrop I.T., 1997: Low and high temperature hardness of WC-6 wt%Co alloys. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 15, 97-101. [https://doi.org/10.1016/S0263-4368\(97\)81231-0](https://doi.org/10.1016/S0263-4368(97)81231-0)

Olovsjö S., Johanson R., Falsafi F., Bexell U., Olsson M., 2013: Surface failure and wear of cemented carbide rock drill buttons - The importance of sample preparation and optimized microscopy settings. *Wear* 302, 1546-1554. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.078>

Pirso J., Letunoviš S., Viljus M., 2004: Friction and wear behaviour of cemented carbides. *Wear* 257, 257-265. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.06.218>

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, 445-455. <https://doi.org/10.1007/BF00538952>

Starodubtsev, S.V., Romanov, A.M., 1962: Prokhozhdenie zaryazhennykh chastits cheres veshchestvo (The passage of charged particles through matter), Academy of Sciences of the Uzbek SSR. Physico-Technical Institute. Tashkent - po rosyjsku

Wilkowski J., Barlak M., Böttger R., Werner Z., 2019: Wpływ separacji jonów azotu w procesie implantacji warstwy wierzchniej ostrzy WC-Co na ich trwałość podczas frezowania płyty wiórowej. *Biuletyn Informacyjny OB-RPPD 3-4*, 135-147. <https://doi.org/10.32086/biuletyn.2019.6>

Wilkowski J., Barlak M., Fiedorowicz H., Bartnik A., Werner Z., 2020: The effect of EUV modification of WC Co indexable knives on the tool life during particleboard milling. *Annals of Warsaw University of Life Science - SGGW, Forestry and Wood Technology* 109, 58-63. 10.5604/01.3001.0014.3175

Zhou Z., Zhou T., Chai L., Tu J., Wang Y., Huang W., Xiao H., Xiao Z., 2015: Microstructure and liquid phase separation of CuCr alloys treated by high current pulsed electron beam. *Materials Research* 18, 34-39. <http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.323714>

Ziółkowski K., 2018: Zależność trwałości ostrzy frezarskich do obróbki materiałów drzewnych od wyboru powierzchni ostrza poddanej modyfikacji elektronowej. Praca inżynierska. Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Technologii Drewna.

Żurawski Ł., 2017: Wpływ elektronowej modyfikacji powierzchni ostrzy frezów do obróbki materiałów drzewnych na ich budowę mikrostrukturalną i trwałość eksploatacyjną. Praca inżynierska. Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Technologii Drewna.

Źródła internetowe

CERATIZIT - www.ceratizit.com (dokument elektroniczny, stan na dzień 24.09.2020)

IHCE SB RAS - https://www.hcei.tsc.ru/index_en.html (dokument elektroniczny, stan na dzień 24.09.2020)

SUSPRE - <https://www.surrey.ac.uk/ion-beam-centre/research/interactions-energetic-particles> (dokument elektroniczny, stan na dzień 24.09.2020)

Artykuł recenzowany / Reviewed paper

Zgłoszony / Submitted: 05.11.2020

Opublikowany online / Published online: 30.12.2020