



Wpływ implantacji CO₂ na okres trwałości narzędzi WC-Co wykorzystywanych w obróbce materiałów drzewnych

The influence of the CO₂ ion implantation 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
Jerzy Zagórski^a, ORCID: 0000-0001-6311-947X
Bogdan Staszkiwicz^a, ORCID: 0000-0002-7741-4362
Filip Szkarłat^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

Artykuł przedstawia wyniki trwałościowych badań wymiennych noży frezarskich WC-Co implantowanych CO₂, wykorzystywanych w obróbce materiałów drzewnych w odniesieniu do noży niemodyfikowanych i modyfikowanych klasycznie w procesie implantacji azotem. Modyfikacji podlegała powierzchnia przyłożenia ostrzy. Zaobserwowano wzrost trwałości o ok. 75% w stosunku do narzędzi niemodyfikowanych. Niestety był on niższy niż wzrost trwałości dla narzędzi implantowanych jonami azotu.

Abstract

The paper presents the results of tool life-time tests of CO₂ implanted WC-Co indexable milling knives used in machining of wood materials, in the comparison to the non-modified knives and the knives classically modified with nitrogen implantation process. The clearance faces were modified. The life-time of CO₂ modified tools was longer than the life-time of the non-modified tools. However, it was shorter than the life-time of the tools implanted with nitrogen ions.

Słowa kluczowe: węgiel spiekany WC-Co, implantacja jonów, obróbka materiałów drzewnych, powierzchnia przyłożenia

Keywords: WC-Co cemented carbide, ion implantation, wood materials machining, clearance face

Wprowadzenie

Implantacja jonów jest jedną z metod poprawy trwałości narzędzi węglkowych WC-Co, powszechnie stosowanych w obróbce materiałów drzewnych (Bartak i in. 2016). Zwiększenie trwałości może być realizowane poprzez obniżenie współczynnika tarcia pomiędzy narzędziem a obrabianym materiałem. W tym celu wprowadza się do badanego układu, pierwiastki, które samodzielnie, bądź w połączeniu z innymi wykazują właściwości smarne. Do najpopularniejszych należą: węgiel, bor, fosfor, chlor i siarka (Petersen i in. 2004).

Węgiel zaimplantowany do przypowierzchniowej warstwy ceramiki typu Al_2O_3 , może wpłynąć na zmniejszenie współczynnika tarcia i zużycie implantowanego materiału (Jun i in.). Autorzy pracy (Zhu i in. 2002) donoszą, że zaimplantowany bor, w obecności azotu i/lub tlenu, może tworzyć związki (BN, B_2O_3) wykazujące właściwości smarujące, co prowadzi do obniżenia współczynnika tarcia. Smarujące działanie chloru było badane np. w ceramicznych warstwach typu TiN (Mitsuo i in. 2003, Aizawa i in. 2004), a siarki - w niskostopowej stali typu 42CrMo4 (Petersen i in. 2004).

W układzie obróbkowym narzędzie-materiał obrabiany, dodatkowy pierwiastek jest wprowadzany zazwyczaj do narzędzi, ze względu na ich mniejsze wymiary i masę. Nie jest to jednak regułą. Autorzy pracy (Barnes i in. 2004) wprowadzali bor do płyt typu OSB i MDF, co wywoływało zmniejszenie zużycia narzędzi podczas obróbki.

Celem niniejszej pracy było zaobserwowanie wpływu węgla, wprowadzonego metodą implantacji jonów na trwałość narzędzi WC-Co, w porównaniu zarówno z nożami niemodyfikowanymi, jak i implantowanymi azotem.

Źródłem implantowanego węgla nie powinien być grafit, ze względu na silne zjawisko jego rozpylania i osadzania w komorze próżniowej implantatora, co w połączeniu z właściwościami fizycznymi węgla (dobre przewodnictwo elektryczne) może doprowadzić nie tylko do zanieczyszczenia aparatury, ale również do jej uszkodzenia.

Węgiel może być dostarczany także w postaci związku gazowego tego pierwiastka, zarówno organicznego, jak i nieorganicznego.

W najprostszym przypadku, węgiel można uzyskać z powszechnie dostępnego metanu CH_4 . Jednakże, w przypadku zastosowania implantatora bez masowej separacji jonów, oprócz węgla, zaimplantowany zostanie także wodór. Co więcej, na 1 atom węgla przypadają aż 4 atomy wodoru. Ze względu m.in. na mały promień atomowy tego pierwiastka (Lumen) należy spodziewać się jego stosunkowo dużego zasięgu (Rys. 1,

Tabela 1 - modelowanie przy pomocy oprogramowania SRIM), a ze względu na małą wartość współczynnika rozpylania - dużej ilości wprowadzonych atomów. Wysoka aktywność chemiczna wodoru może prowadzić do tworzenia się jego związków z pierwiastkami podłoża, a przez to - wywoływać niekorzystne zmiany, np. zwiększać kruchość.

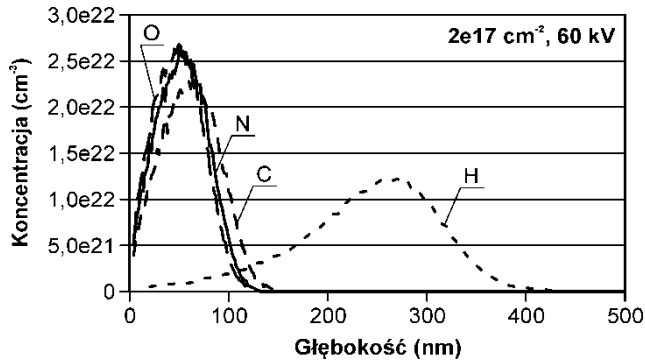
Aby osłabić potencjalnie niekorzystne działanie implantowanego wodoru, należałoby zastosować gaz o bardziej „korzystnym” stosunku ilości atomów węgla do ilości atomów wodoru, jak np. izobutan C_4H_{10} . Niestety, doświadczenia własne autorów niniejszej publikacji, wskazują, że jest to kłopotliwe technologicznie. Podczas implantacji izobutanu bardzo łatwo wytrącała się sadza, która blokowała przepływ gazu w elastycznym przewodzie doprowadzającym go do źródła jonów.

Spśród gazów nieorganicznych, zawierających w swym składzie węgiel, najbardziej popularne są: tlenek węgla CO oraz dwutlenek węgla CO_2 .

Pierwszy z nich, zwany potocznie czadem, wykazuje silne właściwości toksyczne, a więc praca z nim wymagałaby dodatkowych, kosztownych środków ochrony. Związek ten jest dostępny komercyjnie, w postaci „gazu testowego do czujników tlenu węgla”, polecanego dla służb technicznych, zakładów kominarskich, firm zajmujących się sprzedażą i montażem czujników tlenu węgla i dymu tytoniowego oraz osób prywatnych posiadających wyżej wymienione urządzenia, w opakowaniach o pojemności kilkuset lub kilku tysięcy ml, jednakże jak podaje jeden z dostawców, stężenie tlenu węgla wynosi tylko 300 ppm (xelektro.com).

Mniej korzystnym, jeśli brać pod uwagę stosunek ilości atomów węgla do ilości atomów tlenu, jest zastosowanie CO_2 , jako źródła węgla w procesie implantacji. Z drugiej strony, gaz ten jest gazem bezpieczniejszym niż tlenek węgla, tanim i stosowanym powszechnie w wielu dziedzinach życia. Stosując dwutlenek węgla w procesach implantacji należy mieć świadomość, że tlen, podobnie jak wspomniany wcześniej wodór, może reagować z pierwiastkami podłoża tworząc nowe związki. Tak więc oprócz smarowania, w układzie mogą pojawić się inne mechanizmy prowadzące do zmiany trwałości modyfikowanych narzędzi, jak np. umocnienie mikrostruktury implantowanego materiału wydzieleniami tlenków, mogących mieć różny wpływ (zarówno pozytywny, jak i negatywny) na jego właściwości (Śleziona 2001, Korte-Kerzel 2017). Zasięg implantowanego tlenu jest zbliżony do zasięgu implantowanego węgla (Rys. 1, Tabela 1).

W związku z powyższym, dwutlenek węgla został wybrany jako źródło węgla implantowanego do narzędzi WC-Co.



Rys. 1. Głębokościowe profile implantowanych pierwiastków w podłożu W-C-Co
Fig. 1. The depth profiles of the implanted elements in W-C-Co substrate

Tabela 1. Szczegółowe wyniki modelowania parametrów głębokościowych profili implantowanych pierwiastków w podłożu W-C-Co

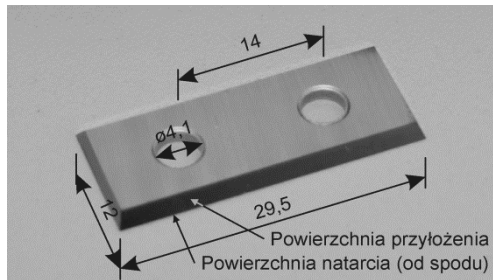
Table 1. The detailed results of the modeling of depth profile parameters of the implanted elements in W-C-Co substrate

Implantowany pierwiastek	Promień atomowy (Å)	Maksymalna koncentracja objętościowa domieszki N_{max} (cm^{-3})	Zasięg rzutowany R_p (nm)	Rozrzut zasięgu ΔR_p (nm)	Kurtoza	Skośność
H	0,37	1,2248e22	235,4	141,8	-0,6113	-0,1627
C	0,77	2,3434e22	59,6	56,2	2,1663	0,168
O	0,73	2,7076e22	48,4	47,8	1,6709	0,3532
N	0,7	2,665e22	51,9	49,8	2,416	0,1422

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

Materiały i metodyka badań

W badaniach wykorzystano dostępne komercyjnie, wymienne noże WC-Co typu KCR08 (Cerazit, Reutte, Austria), stosowane do mechanicznej obróbki materiałów drzewnych, o wymiarach: $29,5 \times 12 \times 1,5 \text{ mm}^3$ (Rys. 1). Parametry geometryczne ostrzy wynosiły: kąt ostrza $\beta = 55^\circ$, kąt przyłożenia $\alpha = 25^\circ$ oraz kąt natarcia $\gamma = 10^\circ$. Skład chemiczny tych narzędzi to: 90,86% wolframu, 5,94% węgla i 3,2% kobaltu wagowo, czyli 47,4% wolframu, 47,4% węgla i 5,2% kobaltu atomowo i o gęstości $15,2 \text{ g/cm}^3$. Według deklaracji producenta, wielkość ziarna WC była w zakresie $0,5\text{-}0,8 \text{ }\mu\text{m}$, twardość materiału noży: 1920 HV10, 1885 HV30 i 93,4 HRA, a ich wytrzymałość na zginanie: 2300 MPa, tj. 334 P.S.I. (CERATIZIT).



Rys. 2. Wymienny nóż WC-Co do obróbki materiałów drzewnych
Fig. 2. WC-Co indexable knife for wood-based material machining

Modyfikacje powierzchni przyłożenia ostrzy prowadzono przy użyciu półprzemysłowego implantatora jonów gazowych, opisanego dokładniej w publikacji (Werner 2007). Zastosowano dawkę na poziomie $2e17 \text{ cm}^{-2}$, a napięcie przyspieszające było rzędu 60 kV. Nie stosowano separacji masowej jonów.

W następnym etapie, noże niemodyfikowane (kontrolne) oraz noże modyfikowane poddano testom zużyciowym. Wykorzystano surową, trójwarstwową płytę wiórową (Pfleiderer, Grajewo, Polska), o grubości 18 mm, będącą standardowym materiałem konstrukcyjnym, szeroko stosowanym w przemyśle meblarskim. Gęstość płyty wynosiła 649 kg/m^3 , jej wytrzymałość na zginanie statyczne (*MOR*) 8,68 MPa, a moduł sprężystości przy zginaniu statycznym (*MOE*) 2212 MPa. Z płyty wiórowej wykonano formatki do testów, o wymiarach $700 \times 330 \text{ mm}^2$.

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

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. Taka wartość jest zalecana przez producentów narzędzi jako optymalna do ewentualnej regeneracji ostrza w procesie ostrzenia. Po osiągnięciu tej wartości nóż był uznawany za stępiony, tj. 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.

Wyznaczone krzywe zużycia stanowiły podstawę do wyznaczenia minimalnej, maksymalnej i średniej wartości drogi skrawania dla wszystkich grup narzędzi. Dla wartości średniej obliczono dodatkowo wartości odchylenia standardowego i błędu standardowego.

Kompleksowo charakteryzując trwałość ostrzy określano wskaźniki średniej trwałości dla grupy modyfikacji, minimalnej i maksymalnej trwałości w grupie modyfikacji, trwałości

względnej RI (ang. *relative index of tool life*) w odniesieniu do grupy ostrzy kontrolnych oraz zmienności trwałości określonej z wykorzystaniem współczynnika zmienności trwałości ostrzy CV (ang. *coefficient of variation of tool life*) w grupie modyfikacji. Ponadto, wyznaczono wartości wskaźnika trwałościowej jakości modyfikacji ostrzy QI (ang. *quality index of tool life*) (Wilkowski i in. 2019, Wilkowski i in. 2020), zdefiniowanego jako iloraz wartości względnego wskaźnika trwałości ostrzy RI i współczynnika zmienności trwałości ostrzy CV :

$$QI = RI/CV \quad (1)$$

gdzie: QI - wskaźnik trwałościowej jakości modyfikacji, RI - względny wskaźnik trwałości ostrzy, CV - współczynnik zmienności trwałości ostrzy, zaś:

$$RI = L_m/L_k \quad (2)$$

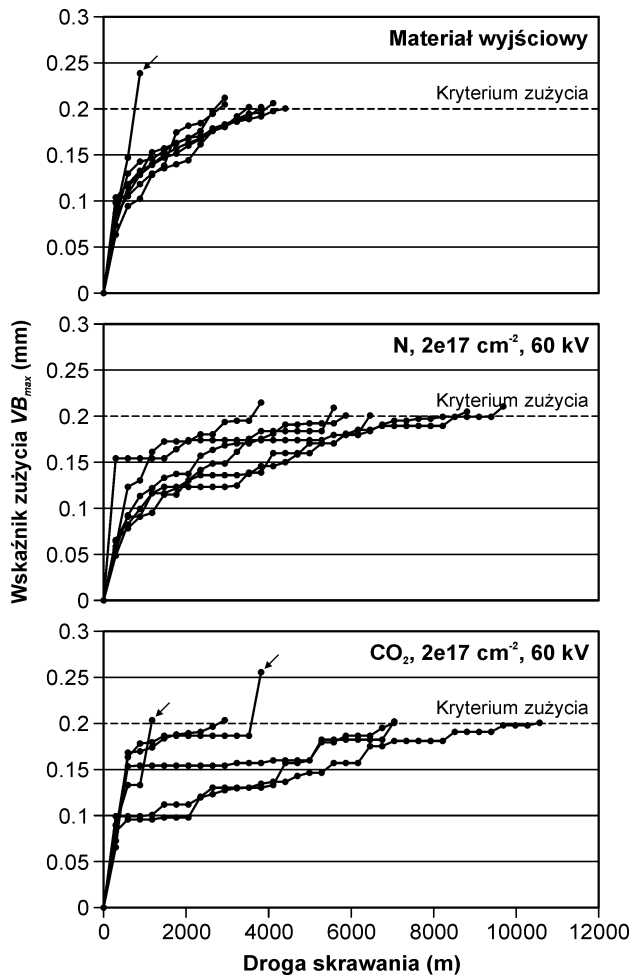
gdzie: RI - względny wskaźnik trwałości ostrzy, L_m - średnia droga skrawania uzyskana dla ostrzy w danym wariantcie modyfikacji - wskaźnik (m), L_k - średnia droga skrawania ostrzy niemodyfikowanych w wariantcie (m), oraz

$$CV = \sigma_L/L \quad (3)$$

gdzie: CV - współczynnik zmienności trwałości ostrzy, σ_L - odchylenie standardowe średniej drogi skrawania w wariantcie (m), L - średnia droga skrawania w wariantcie (m); $L = L_m$ dla ostrzy modyfikowanych i $L = L_k$ dla ostrzy niemodyfikowanych.

Wyniki badań i analiza

Na Rys. 3 przedstawiono krzywe zużycia dla noży niemodyfikowanych, implantowanych azotem i implantowanych dwutlenkiem węgla. Największy rozrzut krzywych występuje dla implantacji CO_2 . Można również zauważyć przypadki gwałtownego wykruszenia ostrza (wskazane strzałkami), przekraczającego kryterium zużycia.



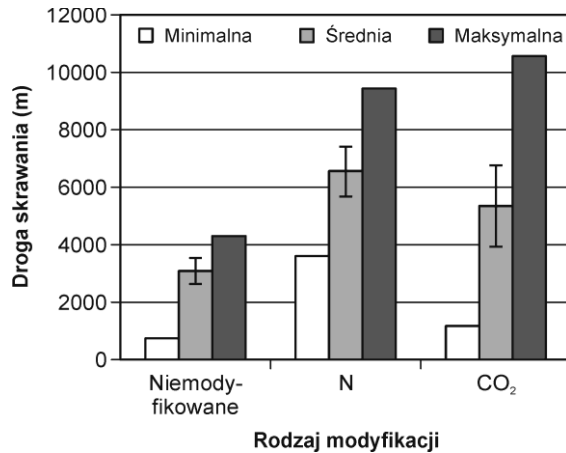
Rys. 3. Krzywe zużycia dla wymiennych noży WC-Co
Fig. 3. The wear curves for the tested WC-Co indexable knives

Okresy trwałości ostrzy wyrażone poprzez średnią, minimalną i maksymalną drogę skrawania do osiągnięcia kryterium zużycia zostały przedstawione na Rys. 4. Minimalne wartości dla ostrzy niemodyfikowanych, ostrzy implantowanych azotem i dwutlenkiem węgla wynosiły w zaokrągleniu do pełnych metrów, odpowiednio: 752, 3599 i 1163 m. Różnica pomiędzy skrajnymi wartościami jest ponad 1,5-krotna.

Maksymalne wartości drogi skrawania wynosiły odpowiednio: 4309, 9425 i 10576 m, a różnica pomiędzy skrajnymi, tj. dla narzędzia niemodyfikowanego i narzędzia implantowanego CO₂ - blisko 2,5-krotna.

Wartości średnie drogi skrawania wynosiły odpowiednio jak wyżej: 3088, 6568 i 5364 m. Wartości odchylenia standardowego dla średniej drogi skrawania wynosiły odpowiednio: 1185, 2129 i 3470 m, a wartości błędu standardowego dla średniej drogi skrawania to

odpowiednio: 448, 869 i 1417 m. Dla przypadku implantacji CO₂, wartość ta wzrosła ponad 3-krotnie w stosunku do przypadku narzędzi niemodyfikowanych.



Rys. 4. Minimalne, średnie i maksymalne wartości drogi skrawania dla wszystkich rodzajów modyfikacji; dla wartości średnich pokazano dodatkowo wartości błęd standardowych w postaci słupków błęd

Fig. 4. 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 2 przedstawiono wyznaczone wartości względnego wskaźnika trwałości ostrzy, współczynnika zmienności trwałości ostrzy i wskaźnika trwałościowej jakości modyfikacji ostrzy. Najwyższy, ponad 2-krotny wzrost wskaźnika trwałości względnej uzyskano dla ostrzy modyfikowanych w procesie implantacji jonów azotu (2,13). Implantacja dwutlenkiem węgla, również przyczyniła się istotnego wzrostu trwałości względnej (1,74), lecz uzyskany efekt był słabszy niż w przypadku jonów azotu. Należy przypuszczać, że mechanizmy wzrostu trwałości ostrzy implantowanych azotem są bardziej złożone niż w przypadku implantacji dwutlenku węgla i nie opierają się wyłącznie na efekcie smarowania i spadku współczynnika tarcia ślizgowego na styku ostrze-materiał obrabiany. Dlatego w kolejnych badaniach należało by przewidzieć tribologiczne testy współczynnika tarcia ślizgowego dla poszczególnych wariantów modyfikacji ostrzy.

Zdecydowanie niekorzystnym skutkiem implantacji dwutlenku węgla jest istotny wzrost współczynnika zmienności trwałości ostrzy w odniesieniu zarówno do ostrzy niemodyfikowanych jak i ostrzy implantowanych azotem (Tabela 2). Wzrost zmienności trwałości może świadczyć o wzrastającym udziale mechanizmu kruchego pęknięcia podczas zużywania ostrza w odniesieniu do mechanizmu typowo ściernego.

Ta negatywna cecha ostrzy implantowanych dwutlenkiem węgla znalazła również odzwierciedlenie w wartościach wskaźnika trwałościowej jakości modyfikacji ostrzy (Tabela 2). Poziom tego wskaźnika w tej grupie narzędzi jest porównywalny do ostrzy

niemodyfikowanych, więc pozytywny efekt względnego przyrost trwałości był niwelowany istotnym wzrostem zmienności trwałości. Wysoka wartość wskaźnika *QI* (ponad 6,5) dla ostrzy implantowanych azotem jeszcze dobitniej podkreśla przewagę tego typu modyfikacji nad pozostałymi wariantami.

Tabela 2. Wartości względnego wskaźnika trwałości ostrzy, współczynnika zmienności trwałości ostrzy oraz wskaźnika trwałościowej jakości modyfikacji ostrzy dla wszystkich grup narzędzi
Table 2. 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	N	CO ₂
Względny wskaźnik trwałości ostrzy, <i>RI</i>	1,00	2,13	1,74
Współczynnik zmienności trwałości ostrzy, <i>CV</i>	0,38	0,32	0,65
Wskaźnik trwałościowej jakości modyfikacji ostrzy, <i>QI</i>	2,61	6,56	2,69

Wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników można wyciągnąć następujące wnioski:

- Modyfikacja ostrzy WC-Co w procesie implantacji dwutlenku węgla zwiększała ich trwałość o 74% w odniesieniu do ostrzy niemodyfikowanych. Jednocześnie była ona powodem istotnego wzrostu zmienności trwałości.
- Najwyższą średnią trwałość uzyskano dla ostrzy implantowanych azotem, przy jednocześnie niskiej zmienności trwałości, co skutkowało najwyższymi wartościami wskaźnika trwałościowej jakości modyfikacji.

Literatura

Aizawa T., Akhadejdamong T., Mitsuo A., 2004: Self-lubrication of nitride ceramic coating by the chlorine ion implantation. *Surface and Coatings Technology* 177-178, 573-581. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00929-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00929-0)

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.

Barnes H.M., Stewart H.A., R Murphy. J., 2004: Vapor boron treatment of composites reduces tool wear. *Forest Products Journal* 54, 69-73.

Jun T., Qizu W., Qunji X., 1998: The solid film lubrication by carbon ion implantation into α -Al₂O₃. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 143, 488-492. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(98\)00416-9](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(98)00416-9)

Korte-Kerzel S., 2017: Microcompression of brittle and anisotropic crystals: recent advances and current challenges in studying plasticity in hard materials. *MRS Communications* 7, 109-120. <https://doi.org/10.1557/mrc.2017.15>

Mitsuo A., Akhadejdamrong T., Aizawa T., 2003: Self-lubrication of Cl-implanted Titanium Nitride coating for dry metal forming. *Materials Transactions* 44, 1295-1302. <https://doi.org/10.2320/matertrans.44.1295>

Petersen J.H., Reitz H., Benzon M.E., Böttiger J., Chevallier J., Mikkelsen N.J., Morgen P., 2004: Tribological properties of sulfur-implanted steel. *Surface and Coatings Technology* 179, 165-175. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00817-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00817-X)

Śleziona J., Formanek B., Wieczorek J., Dolata-Grosz A., 2001: Wytwarzanie kompozytów na podstawie stopów aluminium zbrojonych drobnodispersyjnymi cząstkami ceramicznymi. *Kompozyty* 1, 180-183.

Szkarłat F., 2018: Analiza przebiegu zużycia ostrzy frezarskich do obróbki materiałów drzewnych modyfikowanych różnymi technikami wiązkowymi. Praca inżynierska. Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Technologii Drewna.

Werner Z., Barlak M., Grądzka-Dahlke M., Diduszko R., Szymczyk W., Dąbrowski J., Piekoszewski J., Borkowska K., 2007: The effect of ion implantation on the wear of Co-Cr-Mo alloy. *Vacuum* 81, 1191-1194. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2007.01.014>

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](https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.3175)

Zhu Y.-C., Fujita K., Iwamoto N., Nagasaka H., Kataoka T., 2002: Influence of boron ion implantation on the wear resistance of TiAlN coatings. *Surface and Coatings Technology* 158-159, 664-668. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00238-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00238-4)

Źródła internetowe

CERATIZIT - <https://www.cerazit.com/> (dokument elektroniczny, stan na dzień 04.11.2020)

LUMEN - <https://courses.lumenlearning.com/cheminter/chapter/periodic-trends-atomic-radius/> (dokument elektroniczny, stan na dzień 04.11.2020)

SRIM - <http://www.srim.org/> (dokument elektroniczny, stan na dzień 31.10.2020)

xelektro.com - https://www.xelektro.com/pl/products/gaz-testowy-do-czujnikow-tlenku-wegla-fireangel-eg-gasco-208876.html?gclid=EAlaIqobChMlxzUgKzU7AIVmamyCh31EAe5EAQYAIAABEgLE2_D_BwE (dokument elektroniczny, stan na dzień 04.11.2020)

Artykuł recenzowany / Reviewed paper

Zgłoszony / Submitted: 05.11.2020

Opublikowany online / Published online: 30.12.2020