



Wpływ chropowatości powierzchni narzędzi WC-Co do obróbki materiałów drzewnych na modelowane parametry głębokościowych profili implantowanego azotu

Effect of the surface roughness of WC-Co tools for wood materials machining on the modeled parameters of the depth profiles of implanted nitrogen

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

^aSzkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Instytut Nauk Drzewnych i Meblarstwa, 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

*Osoba do korespondencji: jacek_wilkowski@sggw.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono zależności parametrów głębokościowych profili uzyskanych podczas modelowania implantacji jonów azotu od parametrów profilu pierwotnego chropowatości powierzchni narzędzi WC-Co do obróbki materiałów drzewnych. Opracowano algorytm wyznaczania średniego kąta padania wiązki jonów na powierzchnię implantowaną, który wykorzystano w programie modelującym głębokościowe profile. Wykazano wysokie zależności korelacyjne parametru rozrzutu zasięgu ΔR_p od badanych parametrów profilu pierwotnego chropowatości powierzchni WC-Co: średniej arytmetycznej odchyłek profilu pierwotnego P_a , średniej kwadratowej odchyłek profilu pierwotnego P_q i maksymalnej wysokości profilu pierwotnego P_z .

Abstract

The paper presents relationship of the parameters of depth profiles obtained during modeling of nitrogen ion implantation on the parameters of primary profile surface roughness of WC-Co tools used in wood materials machining. An algorithm was developed for determining the average angle of incidence of the ion beam on implanted surface, which was used in the program modeling the depth profiles. High correlation relationships between the range straggling parameter ΔR_p and three tested parameters of the primary surface

roughness profile were shown: the arithmetic mean of the primary profile deviations P_a , the square mean of the primary profile deviations P_q and the maximum height of the primary profile P_z .

Słowa kluczowe: węgiel spiekany WC-Co, chropowatość powierzchni, profil pierwotny, implantacja jonów azotu, kąt padania, modelowanie, SRIM

Keywords: WC-Co cemented carbide, surface roughness, primary profile, nitrogen ion implantation, angle of incidence, modeling, SRIM code

Wprowadzenie

Implantacja jonów jest metodą modyfikacji powierzchni materiałów, np.: poprawy właściwości tribologicznych, zwilżalności powierzchni, odporności korozyjnej, a w efekcie zwiększenia ich trwałości użytkowej. W implantacji wykorzystuje się wysoką energię kinetyczną jonów domieszki, przyspieszonych i formowanych w polu elektrycznym w wiązkę, a następnie wbijanych (implantowanych) do powierzchni modyfikowanego materiału. Implantacja jonów nie powoduje zmiany kształtu i wymiarów modyfikowanych materiałów, a modyfikowany obszar nie jest powłoką, więc nie występuje problem adhezji warstwy do podłoża (Barlak i in. 2016, Barlak i in. 2017a, Pysznik 2015).

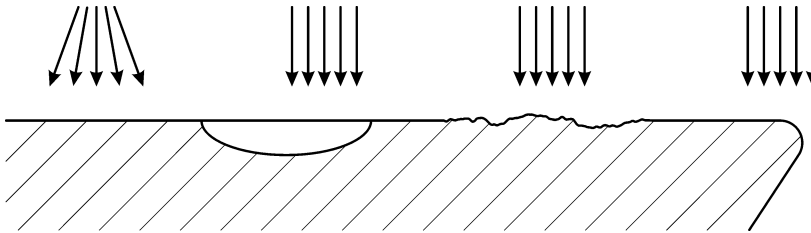
W wyniku implantacji jonów uzyskuje się wzrost trwałości narzędzi stosowanych do obróbki materiałów drzewnych, który może wynieść nawet ponad 100% (Wilkowski i in. 2019, Wilkowski i in. 2021, Barlak i in. 2017b). Wzrost trwałości zależy od wielu czynników, w tym również od parametrów procesu implantacji do których zaliczamy m.in. dawkę implantowanych jonów na jednostkę modyfikowanej powierzchni, oraz energię kinetyczną implantowanych jonów uzyskaną w polu elektromagnetycznym. Istotny wpływ tych dwóch parametrów pokazano w publikacji Wilkowski i in. 2021.

Największa efektywność implantacji jest osiągana dla wiązki jonów nakierowanej prostopadle do modyfikowanej powierzchni, czyli dla kąta padania wiązki równego 0° . Efektywność ta maleje wraz z odchyleniem wiązki, tj. ze wzrostem kąta jej padania. Zmniejsza się koncentracja objętościowa implantowanej domieszki, jej zasięg rzutowany oraz rozrzut zasięgu. Zmianie ulegają też kurtoza i skośność profili implantowanego pierwiastka (Barlak i in. 2019a,b). Ponadto, w przypadku większych wartości kąta nachylenia znaczna część implantowanych jonów jest rozpraszana (Mizotani i in. 2015, Shallow Junction Formation 2021, Sigmund 1969). Należy zdawać sobie sprawę, że prostopadle ustawienie wiązki do modyfikowanej powierzchni jest w praktyce trudne do uzyskania. Wynika to z wielu przyczyn, do których należy zaliczyć:

- rozbieżność wiązki jonów,
- zmienny kształt implantowanej powierzchni (w przypadku narzędzi wynikający z geometrii ostrza),

- falistość i chropowatość implantowanej powierzchni (w przypadku narzędzi zależny od obróbek wykańczających typu szlifowanie, polerowanie),
- wady i uszkodzenia powierzchni (zarysowania, wyrwania, pęknięcia, itp.).

Wybrane sytuacje nieprostotpadłości wiązki implantowanych jonów względem powierzchni przyłożenia ostrza pokazano schematycznie na Rys. 1.



Rys. 1. Schemat nieprostotpadłości wiązki jonów względem powierzchni przyłożenia narzędzia
Fig. 1. The scheme of non-perpendicularity of the ions beam in relation to the clearance face of tool

Najczęstszym przypadkiem nieprostotpadłości wiązki, którego dla narzędzi nie da się całkowicie wyeliminować, jest ten związany z falistością i chropowatością powierzchni będącej wynikiem obróbek wykańczających, związanych z przygotowaniem narzędzia do pracy w procesie szlifowania jego powierzchni roboczych. Taki przypadek analizowano w tej publikacji.

W celu oceny zasięgu modyfikacji, proces implantacji jonów powinien być poprzedzony modelowaniem głębokościowych profili pierwiastków wprowadzanych do modyfikowanego podłoża. Modelowanie to pozwala na poznanie charakteru modyfikacji, zawężenie obszaru prac badawczych i ich ukierunkowanie, poprzez zaproponowanie parametrów procesu, a przez to - na skrócenie czasu badań i obniżenie nakładów finansowych (Barlak i in. 2019a,b). Ponadto, skorelowanie parametrów zamodelowanego profilu głębokościowego jonów z cechami użytkowymi powierzchni modyfikowanego materiału (wzrost trwałości, zwiększenie odporności korozyjnej, tribologicznej, energii powierzchniowej) pozwoliło by na tanią i szybką weryfikację skutków procesu implantacji. Taką próbę podjęto w publikacji Barlak i in. 2019c.

Równie ważnym aspektem jest ocena wpływu parametrów struktury geometrycznej powierzchni (falistości, chropowatości) wymuszającej nieprostotpadłość wiązki jonów podczas implantacji na parametry modelowanego profilu głębokościowego implantowanego pierwiastka w materiale modyfikowanym. Wiedza ta pozwoli również na zweryfikowanie hipotezy o wystarczającym lub nie stanie przygotowanych powierzchni roboczych ostrza skrawającego podczas szlifowania w kontekście jakości modyfikacji jego warstwy wierzchniej w procesie implantacji jonów.

Cel i zakres pracy

W niniejszym artykule określono zależności parametrów głębokościowych profili uzyskanych podczas modelowania implantacji jonów azotu w programie SRIM od parametrów profilu pierwotnego chropowatości powierzchni narzędzi WC-Co do obróbki materiałów drzewnych, wyznaczonych eksperymentalnie przy użyciu profilometru stykowego. Opracowano również algorytm wyznaczania średniego kąta padania wiązki jonów na powierzchnię implantowaną, który był parametrem wyjściowym w programie modelującym głębokościowe profile i ich parametry.

Materiały i metodyka badań

Modelowanie zasięgu jonów implantowanego azotu do warstwy wierzchniej ostrzy WC-Co

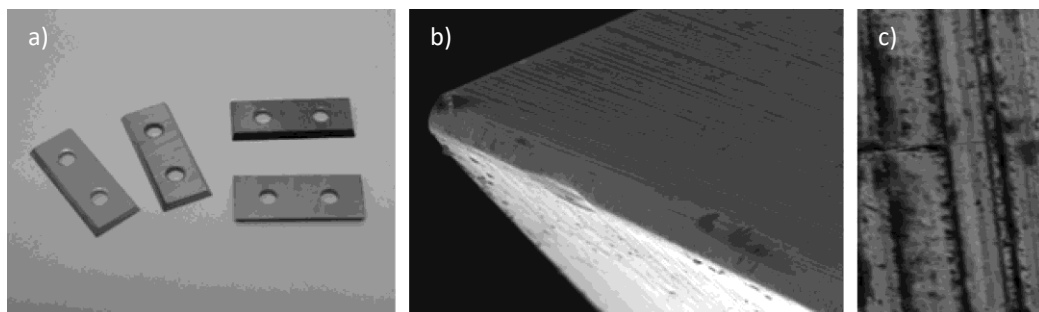
Określenie kątów rozpraszania jonów zderzających się z atomami powierzchni ciała stałego, czy też sił działających na jon podczas implantacji lub zasięgu jonów w implantowanym materiale jest możliwe dzięki znajomości potencjału oddziaływania między zderzającymi się cząstkami (jon-atom). Potencjał ten ma charakter elektrostatyczny i może być długo- lub krótkozasięgowy. Oddziaływanie długozasięgowe pomiędzy dwiema naładowanymi cząstkami opisuje prawo Culomba, a wartość tego potencjału zależy od liczb ładunkowych oddziałujących atomów oraz ich wzajemnej odległości. Oddziaływania krótkozasięgowe mają inne własności, które pozwalają między innymi na powstawanie wiązań chemicznych. Implantowane jony mają energię początkową rzędu $\sim$ keV, znacznie przewyższającą energię wiązania atomów w implantowanym materiale ($\sim$ eV). Stąd, możliwe są oddziaływania dalekiego, jak i krótkiego zasięgu, w zależności od energii zderzenia (Fritzsche 1977, Kelly i Miotello 1996).

Parametry profili głębokościowych zasięgu jonów azotu implantowanych do powierzchni WC-Co uzyskano w wyniku zastosowania pakietu oprogramowania SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) opracowanego przez Zieglera i Biersacka (SRIM 2021, Biersack 1981). Do tego celu wykorzystano program symulacyjny TRIM (Transport of Ions in Matter) z tego pakietu. Działanie TRIM opiera się na metodzie Monte Carlo (Barlak i in. 2019b).

Za twórców metody Monte Carlo uważa się polskiego matematyka Stanisława Ulama, oraz węgierskiego naukowca Johna von Neumanna (właściwie János Lajos Neumann). Pierwszy z nich był przedstawicielem tzw. lwowskiej szkoły matematycznej działające w dwudziestoleciu międzywojennym we Lwowie. Należeli do niej oprócz Ulama, m.in.: Stefan Banach, Kazimierz Kuratowski, Władysław Orlicz i Hugo Steinhaus. Ulam wspólnie z Neumannem uczestniczyli w projekcie Manhattan w Stanach Zjednoczonych, w ramach którego zbudowano pierwszy reaktor atomowy oraz pierwszą bombę atomową, a także brali udział w projekcie budowy bomby wodorowej.

Wykorzystanie metody Monte Carlo w symulacji zderzeń jonów z atomami implantowanej warstwy wierzchniej materiału świadczy o losowym charakterze tego procesu. W analizie zderzeń w programie TRIM stosuje się tzw. model BCA (Binary

Collision Aproximation), w którym zakłada się, że w zderzeniu uczestniczą tylko dwie cząstki, natomiast sąsiednie atomy nie wpływają na przebieg kolizji. Ponadto, energia implantowanego jonu w porównaniu z energią wiązania atomu w sieci krystalicznej (średnio 14 eV) jest znacznie większa, co pozwala w analizie zderzeń uważać układ jon-atom za izolowany. Założenia modelu BCA przestają obowiązywać dla małych energii padającego jonu. Przyjmuje się, że graniczną wartością energii jest 10 eV, kiedy to wpływ sąsiednich atomów, niebiorących bezpośredniego udziału w zderzeniu, zaczyna odgrywać istotną rolę (Pyszniak 2015).



Rys. 2. Wymienne noże do głowic frezarskich (a), obraz SEM powierzchni przyłożenia ostrza - powiększenie 200× (b), ślady po szlifowaniu ostrza - obraz SEM, powiększenie 7500× (c)

Fig. 2. WC-Co indexable knives for milling heads (a), SEM image of the blade clearance face - magnification 200× (b), traces of blade grinding - SEM image, magnification 7500× (c)

Koniecznymi do określenia parametrami wejściowymi do symulacji TRIM są:

- rodzaj implantowanych jonów, w przypadku tych badań były to jony azotu N^+ , czyli przyjęto, że wiązka jonów była separowana masowo,
- energia implantacji wynosiła 50 keV,
- dawka implantowanych jonów wynosiła $1e17\text{ cm}^{-2}$,
- modyfikowane podłoże, którym była powierzchnia przyłożenia ostrzy WC-Co do obróbki frezowaniem materiałów drzewnych (Rys. 2). Gęstość i udział pierwiastków w implantowanym materiale WC-Co podano w Tabeli 1.

Tabela 1. Gęstość i udział pierwiastków w materiale WC-Co (Cerazit, Austria)

Table 1. The density and content of the elements in the material WC-Co (by Cerazit, Austria)

Oznaczenie ostrzy	Gęstość (g/cm ³)	Udział wagowy (%)			Udział atomowy (%)		
		Co	W	C	Co	W	C
KCR08	15,20	3,2	90,87	5,93	5,20	47,40	47,40
Wartości podane przez producenta					Wartości obliczone		

Ważnym parametrem wejściowym do symulacji TRIM jest również kąt padania wiązki jonów. Kąt ten można zmieniać w programie w szerokim zakresie od 0° do 89,9°.

Oczywiście, każda zmiana wartości tego kąta ma wpływ na przebieg implantacji, a tym samym na wartości wyjściowych parametrów profili głębokościowych jonów w implantowanym materiale. Tak jak wspomniano we wprowadzeniu, kąt padania wiązki jest realnie różny od wartości 0° , oznaczającej prostopadłość względem implantowanej powierzchni, gdyż ten stan graniczny jest trudny, a czasami wręcz niemożliwym do uzyskania w warunkach rzeczywistych. W niniejszych badaniach analizowano wpływ chropowatości powierzchni przyłożenia ostrzy WC-Co po przemysłowej obróbce wykańczającej (szlifowaniem) na wartości kąta padania jonów podczas implantacji. Ślady po szlifowaniu ostrza pokazano na Rys. 2. W programie modelującym wprowadzano wartość średniego kąta padania wiązki jonów wyznaczonego na podstawie opracowanego algorytmu bazującego na profilu pierwotnym struktury geometrycznej powierzchni. Metodkę pomiaru profilu pierwotnego chropowatości powierzchni oraz algorytm wyznaczenia średniego kąta padania jonów opisano w kolejnych podrozdziałach.

Wynikiem modelowania zasięgu jonów implantowanego azotu do warstwy wierzchniej ostrzy WC-Co były następujące parametry profilu głębokościowego:

- maksymalna koncentracja objętościowa implantowanego pierwiastka (ang. *peak volume dopant concentration*) N_{max} ,
- zasięg rzutowany (ang. *projected range*) R_p ,
- rozrzut zasięgu (ang. *range straggling*) ΔR_p ,
- kurtoza (ang. *kurtosis*) K , będąca miarą koncentracji i spłaszczenia rozkładu,
- skośność (ang. *skewness*) S , będąca miarą asymetrii rozkładu.

Powyższe parametry zostały opisane w artykule Barlak i in. 2019b.

Pomiar chropowatości powierzchni przyłożenia ostrzy WC-Co

W pomiarach chropowatości powierzchni przyłożenia ostrzy WC-Co (Rys. 2) wykorzystano profilometr stykowy Mitutoyo SJ-201 z diamentową końcówką pomiarową w kształcie zakończzonego sferycznie stożka o promieniu $2\ \mu\text{m}$ i kącie stożka równym 60° (Rys. 3). Długość odcinka „cutoff” profilu chropowatości l_c wynosiła $0,08\ \text{mm}$. Pomiar był wykonywany na powierzchni przyłożenia ostrza równolegle do głównej krawędzi tnącej. Pomiarzy wykonano na wybranych powierzchniach przyłożenia pięciu wymiennych noży do głowic frezarskich (Rys. 2). Na każdej powierzchni przyłożenia ostrza wykonywano trzy pomiary w losowo wybranych miejscach.

Analizowano profile pierwotne, odpowiadające profilom zmierzonym bez stosowania filtracji dolnoprzepustowej, czy górnoprzepustowej. Przykładowy profil pierwotny chropowatości powierzchni pokazano na Rys. 3. Na podstawie profilu pierwotnego wyznaczano następujące parametry:

- średnią arytmetyczną odchyłek profilu pierwotnego P_a , zdefiniowaną jako średnią arytmetyczną wartości bezwzględnych rzędnych $Z(x)$ na odcinku elementarnym l :

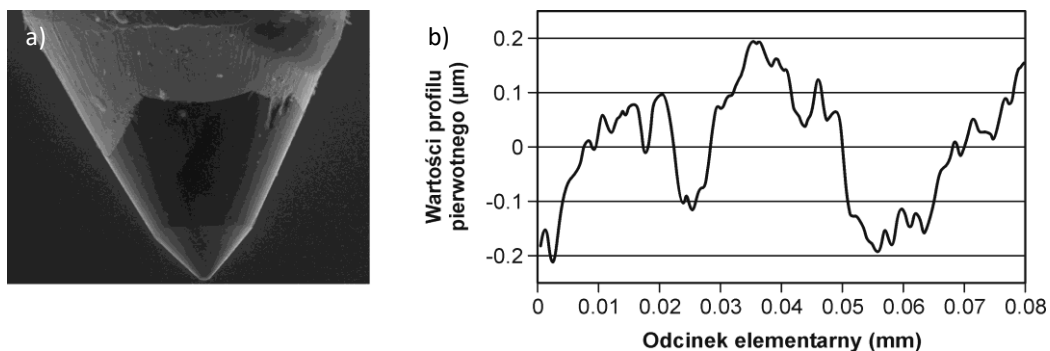
$$P_a = \frac{1}{l_0} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (1)$$

- średnią kwadratową odchyłek profilu pierwotnego P_q , zdefiniowaną jako średnią kwadratową rzędnych profilu $Z(x)$ na długości odcinka elementarnego l :

$$P_q = \sqrt{\frac{1}{l_0} \int_0^l Z^2(x) dx} \quad (2)$$

- maksymalną wysokość profilu pierwotnego P_z , zdefiniowaną jako suma wysokości najwyższego wzniesienia profilu Z_p i największej głębokości Z_v wewnątrz odcinka elementarnego.

Jak już wspomniano, każda badana powierzchnia przyłożenia była charakteryzowana przez trzy pomiary, zatem określono dla niej parametry średnie będące średnią arytmetyczną z tych pomiarów.



Rys. 3. Końcówka pomiarowa (igła pomiarowa) wykorzystana w badaniach chropowatości powierzchni - powiększenie 500× (a), przykładowy profil pierwotny chropowatości powierzchni przyłożenia ostrza WC-Co (b)

Fig. 3. Measuring tip (measuring needle) used in surface roughness tests - magnification 500× (a), an example of a WC-Co primary surface roughness profile (b)

Algorytm wyznaczania średniego kąta padania wiązki jonów na powierzchnię implantowaną

Profile pierwotne uzyskane podczas pomiarów profilometrem stykowym posłużyły do wyznaczenia kątów padania wiązki na implantowaną powierzchnię. Każdy profil był charakteryzowany przez 160 punktów na długości odcinka elementarnego równej 0,08 mm. Podziałka elementarna osi pomiarowych wynosiła 5e-4 mm. Na podstawie kolejnych dwóch punktów i ich współrzędnych kartezjańskich, zaczynając od początku profilu, określano tangens kąta nachylenia do osi X prostej przechodzącej przez te dwa punkty. Operację powtarzano w pętli dla kolejnych par punktów: drugiego i trzeciego, trzeciego i czwartego, czwartego i piątego, itd., aż do pary punktów z ostatnim włącznie, który kończył ten etap

obliczeń. Z tangensów kątów nachylenia prostych wyznaczano wartości tych kątów w stopniach. W celu transformacji kąta nachylenia prostej do osi odciętych (X) w kąt padania jonów, odjęto otrzymane wartości od 90° . Tak otrzymane kąta padania jonów uśredniono dla całego profilu pierwotnego otrzymując kąt średni padania wiązki jonów charakteryzujący ten profil. Ponieważ jedna powierzchnia przyłożenia charakteryzowana była przez trzy profile pierwotne, uśredniono również wartości kątów dla tych profili. Zatem jeden nóż do głowicy frezarskiej charakteryzowany był przez jeden średni kąt padania wiązki jonów określony na podstawie trzech profili pierwotnych chropowatości powierzchni.

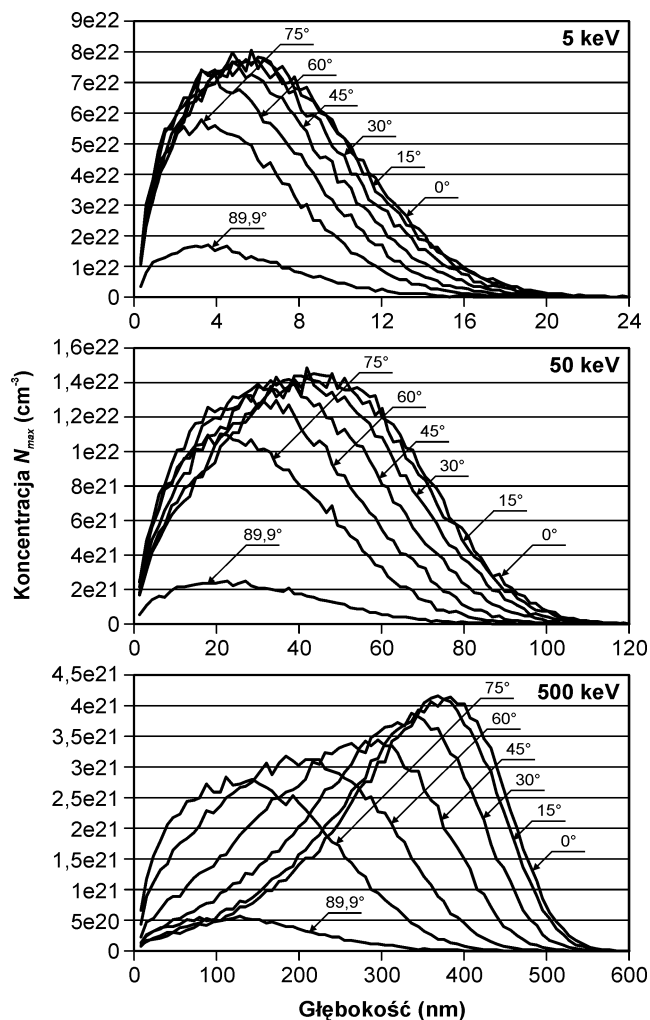
Wyniki badań i analiza

Na Rys. 4 pokazano głębokościowe profile azotu w podłożu W-C-Co zamodelowane dla różnych kątów padania jonów oraz dla trzech wariantów energii implantacji. Należy zwrócić uwagę, że kąt padania wiązki zmienia się skokowo w szerokim zakresie od 0° do $89,9^\circ$. Zmiana ta pociąga za sobą istotne transformacje kształtu profilu głębokościowego. Ze wzrostem kąta profil przesuwają się w kierunku początku układu współrzędnych, zatem maleje wartość zasięgu rzutowanego R_p , obniża się również maksymalna koncentracja objętościowa implantowanego pierwiastka N_{max} , spada także rozrzut zasięgu ΔR_p . Tendencje te dokładnie widać w Tabeli 2, dla trzech wybranych wartości kąta padania jonów, w tym samym, co na Rys. 4, szerokim zakresie jego zmiany. Obserwujemy jednocześnie wzrost kurtozy i skośności w kierunku skośności prawostronnej. Oczywiście wzrost energii implantacji w podanym zakresie powoduje zwiększenie zasięgu rzutowanego jonów R_p , ale jednocześnie obniżenie maksymalnej koncentracji objętościowej implantowanego pierwiastka N_{max} (Rys. 4).

Tabela 2. Wartości parametrów wyjściowych modelowania głębokościowych profili w podłożu W-C-Co dla wybranych hipotetycznych kątów padania jonów

Table 2. The values of output parameters for modeling of depth profiles in W-C-Co substrate for selected hypothetical angles of ions incidence

Kąt padania jonów	Maksymalna koncentracja objętościowa domieszki N_{max} (cm ⁻³)	Zasięg rzutowany R_p (nm)	Rozrzut zasięgu ΔR_p (nm)	Kurtoza	Skośność
0°	1,458e22	44,4	21,9	2,4435	0,1964
45°	1,450e22	37,5	20,0	2,5733	0,3658
$89,9^\circ$	2,533e21	29,0	16,9	2,8897	0,5701



Rys. 4. Głębokościowe profile azotu w podłożu W-C-Co zamodelowane dla różnych kątów padania jonów oraz dla trzech wariantów energii implantacji

Fig. 4. The depth profiles of nitrogen in the W-C-Co substrate modeled for different angles of incidence of ions and for three variants of implantation energy

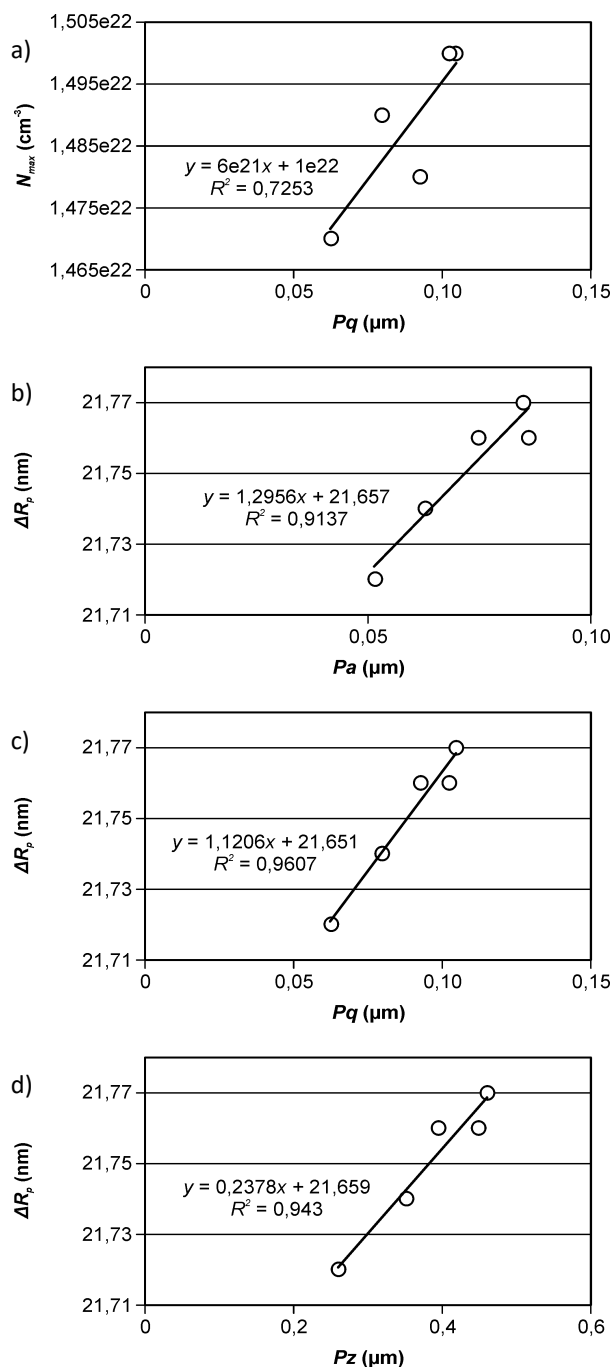
W Tabeli 3 przedstawiono wartości parametrów wyjściowych modelowania głębokościowych profili w podłożu W-C-Co dla średnich kątów padania jonów określonych z wykorzystaniem przedstawionego algorytmu bazującego na analizie zmierzonych profili pierwotnych chropowatości powierzchni. Obserwuje się niewielką zmianę średniego kąta w zakresie od $5,32^\circ$ do $7,99^\circ$. Zakres ten związany jest ze zmiennością chropowatości powierzchni przyłożenia noży do głowic frezarskich przygotowywanej w warunkach przemysłowych w obróbce szlifowaniem. Powierzchnie te nie są w warunkach przemysłowych polerowane ze względu na ograniczenie kosztów ich wytworzenia.

Tabela 3. Wartości parametrów wyjściowych modelowania głębokościowych profili w podłożu W-C-Co dla średnich kątów padania jonów określonych na podstawie profili pierwotnych chropowatości powierzchni

Table 3. The values of output parameters of modeling depth profiles in the W-C-Co substrate for the average angles of ions incidence determined on the basis of primary surface roughness profiles

Średni kąt padania jonów	Maksymalna koncentracja objętościowa domieszki N_{max} (cm ⁻³)	Zasięg rzutowany R_p (nm)	Rozrzut zasięgu ΔR_p (nm)	Kurtoza	Skośność
5,32°	1,496e22	44,28	21,77	2,4423	0,1896
5,73°	1,480e22	44,37	21,76	2,4421	0,1894
6,07°	1,489e22	44,32	21,74	2,4577	0,1963
6,30°	1,504e22	44,37	21,76	2,4540	0,1898
7,99°	1,467e22	44,19	21,72	2,4509	0,1932

Na Rys. 5 przedstawiono najistotniejsze zależności korelacyjne modelowanych parametrów profilu głębokościowego implantowanych jonów od zmierzonych parametrów profilu pierwotnego chropowatości powierzchni. Wszystkie trzy badane parametry profilu pierwotnego (P_a , P_q i P_z) wykazują wysoki związek korelacyjny (współczynnik determinacji R^2 powyżej wartości 0,9) z rozrzutem zasięgu implantowanych jonów azotu ΔR_p uzyskanym w modelowaniu w programie TRIM (Rys. 5b-d). Nieco niższe zależności uzyskano dla związku między parametrem P_q , czyli średnią kwadratową odchyłek profilu pierwotnego, a maksymalną koncentracją objętościową implantowanego pierwiastka N_{max} (Rys. 5a). Niemniej jednak ważną obserwacją z przeprowadzonych prac badawczych jest wykazanie tych zależności, gdyż ze wcześniejszych prac wynika duży związek modelowanych profili głębokościowych jonów azotu implantowanych do W-C-Co z zaobserwowanymi rzeczywistymi profilami uzyskanymi w badaniach SIMS tego materiału oraz z jego cechami użytkowymi, np. ze zwiększeniem trwałości ostrzy implantowanych (Wilkowski i in. 2018, 2021). A zatem chropowatość powierzchni przyłożenia ostrzy wpływa na wynik procesu implantacji tej powierzchni, a pośrednio decyduje również o procesach zużyciowych modyfikowanych narzędzi w trakcie obróbki materiałów drzewnych (Wilkowski i in. 2021).



Rys. 5. Zależności korelacyjne modelowanych parametrów profilu głębokościowego implantowanych jonów od parametrów profilu pierwotnego chropowatości powierzchni

Fig. 5. Correlation relationships of the modeled parameters of the depth profile of implanted ions on the parameters of the primary surface roughness profile

Wnioski

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Wykazano wysokie zależności korelacyjne między badanymi parametrami profilu pierwotnego powierzchni przyłożenia ostrzy WC-Co, a parametrem rozrzutu zasięgu implantowanych jonów azotu ΔR_p uzyskanym w modelowaniu w programie TRIM.
2. Zaproponowany w badaniach algorytm wyznaczania średniego kąta padania wiązki jonów na powierzchnię implantowaną jest użytecznym narzędziem urealnienia parametrów wejściowych do modelowania przebiegu procesu implantacji.
3. Średni kąt padania wiązki jonów na powierzchnię przyłożenia ostrzy WC-Co zmieniał się w zakresie od $5,32^\circ$ do $7,99^\circ$ i był związany ze stanem przygotowania powierzchni w przemysłowej obróbce wykańczającej (szlifowaniem) noży do głowic frezarskich do obróbki materiałów drzewnych.

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., Werner Z., Pałubicki B., 2017a: Changes of functional properties of materials used in wood industry after ion implantation process. *Annals of Warsaw University of Life Science - SGGW, Forestry and Wood Technology* 97, 133-139

Barlak M., Wilkowski J., 2017b: Innowacyjne metody zwiększania trwałości narzędzi skrawających dla przemysłu meblarskiego. *Biuletyn Informacyjny OB-RPPD 3-4*, 95-105, <https://doi.org/10.32086/biuletyn.2017.03>

Barlak M., Wilkowski J., Werner Z., 2019a: Modelling of the ion implantation modification of WC-Co indexable knives for wood machining. *Annals of Warsaw University of Life Science - SGGW, Forestry and Wood Technology* 106, 57-61.

Barlak M., Wilkowski J., Werner Z., 2019b: Wybrane problemy modelowania głębokościowych profili pierwiastków, implantowanych do narzędzi wykorzystywanych w obróbce materiałów drzewnych. *Biuletyn Informacyjny OB-RPPD 3-4*, 118-134. <https://doi.org/10.32086/biuletyn.2019.5>

Barlak M., Wilkowski J., Szymanowski K., Czarniak P., Podziewski P., Werner Z., Zagórski J., Staszkiwicz B., 2019c: Influence of the ion implantation of nitrogen and selected metals on the lifetime of WC-Co indexable knives during MDF machining. *Annals of Warsaw University of Life Science - SGGW, Forestry and Wood Technology* 108, 45-52.

Biersack J.P., 1981: Calculation of projected ranges - analytical solutions and a simple general algorithm. *Nuclear Instruments and Methods* 182-183, 199-206. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(81\)90688-1](https://doi.org/10.1016/0029-554X(81)90688-1)

Fritzsche C.R., 1977: A simple method for the calculation of energy deposition profiles from range data of implanted ions. *Applied Physics* 12, 347-353. <https://doi.org/10.1007/BF00886037>

Kelly R., Miotello A., 1996: Metal-ceramic ion-beam mixing: a quest for general principles. *Surface and Coatings Technology* 83, 134-145. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02782-3](https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02782-3)

Mizotani K., Isobe M., Hamaguchi S., 2015: Molecular dynamic simulation of damage formation at Si vertical walls by grazing incidence of energetic ions in gate etching processes. *Journal of Vacuum Science & Technology A* 33, 021313-1-6. <http://dx.doi.org/10.1116/1.4907724>

Pysznik K., 2015: Wykorzystanie zjawisk towarzyszących bombardowaniu jonowemu w diagnostyce procesu implantacji. Rozprawa doktorska. Narodowe Centrum Badań Jądrowych Świerk.

Sigmund P., 1969: Theory of sputtering. I. Sputtering yield of amorphous and polycrystalline targets. *Physical Review* 184(2), 383-416. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.184.383>

Wilkowski J., Barlak M., Konarski P., Böttger R., Werner Z., 2018: SIMS depth profile analysis of WC-Co composite used in wood materials machining after nitrogen ion implantation. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW, Forestry and Wood Technology* 104, 400-404.

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, 209-220. <https://doi.org/10.22382/wfs-2019-021>

Wilkowski J., Barlak M., Böttger R., Werner Z., Konarski P., Pisarek M., Wachowicz J., Von Borany J., Auriga A., 2021: Effect of nitrogen ion implantation on the life time of WC-Co tools used in particleboard milling. *Wood Material Science & Engineering* 2021, 1-12. <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1900391>

Źródła internetowe

Shallow Junction Formation - https://ebrary.net/184575/engineering/shallow_junction_formation (dokument elektroniczny, stan na dzień 10.12.2021)

SRIM - <http://www.srim.org/> (dokument elektroniczny, stan na dzień 10.12.2021)

Artykuł recenzowany / Reviewed paper

Zgłoszony / Submitted: 20.12.2021

Opublikowany online / Published online: 29.12.2021