

Dr hab. inż. Anna ZAWADA-TOMKIEWICZ, prof. PK (Politechnika Koszalińska):

ANALIZA KSZTAŁTOWANIA STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI W MIKROSKALI DLA PROCESU TOCZENIA STALI UTWARDZONEJ

Streszczenie

Artykuł omawia zagadnienia modelowania powierzchni w mikroskali. Przeanalizowano zjawisko bocznego płynięcia materiału wynikające z zaokrąglenia krawędzi skrawającej oraz wpływ mikrotopograficznej nieregularności krawędzi skrawającej na mikronierówności powierzchni obrobionej.

Słowa kluczowe: *modelowanie powierzchni obrobionej, mikrogeometria krawędzi skrawającej*

ANALYSIS OF FORMING OF THE SURFACE GEOMETRICAL STRUCTURE ON A MICROSCALE FOR THE HARDENED STEEL TURNING PROCESS

Abstract

The article discusses the issues of surface modelling on a microscale. The analysis covered material side flow, resulting from the curve of the cutting edge, and the impact of microtopographic irregularities of the cutting edge on the microroughness of the machined surface.

Keywords: *machined surface modelling, cutting edge microgeometry*

ANALIZA KSZTAŁTOWANIA STRUKTURY GEOMETRYCZ- NEJ POWIERZCHNI W MIKROSKALI DLA PROCESU TOCZENIA STALI UTWARDZANEJ

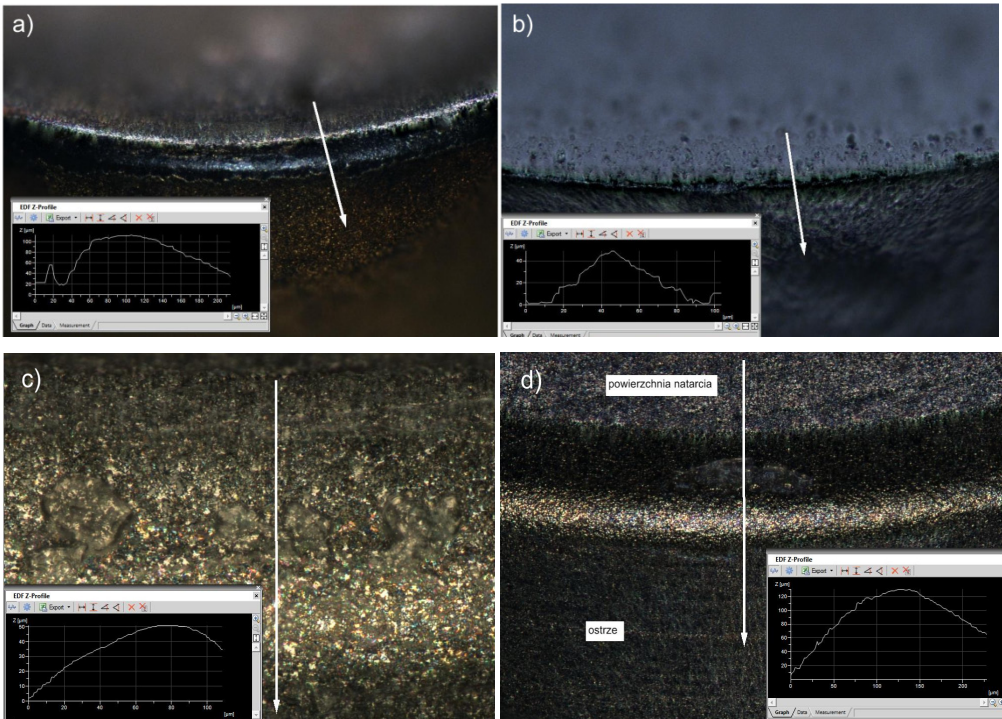
Anna ZAWADA-TOMKIEWICZ¹

1. WPROWADZENIE

Zmierzone wysokości nierówności i parametry opisujące ich rozkład przy ocenie powierzchni po toczeniu są większe od wyznaczonych w badaniach teoretycznych. Zmienność rozkładu nierówności spowodowana jest zaburzeniami fizykalnymi, zachodzącymi w kinematyce ruchu narzędzia i przedmiotu (deformacje sprężyste, drgania) oraz w procesie skrawania (mechanika oddzielania wióra, tarcie, zużycie ostrza). Dodatkowe składowe zwiększają wysokości nierówności w różnym stopniu, a udział ich w strukturze geometrycznej powierzchni nie jest jednoznaczny. Wielu badaczy opisywało wpływ różnych cząstkowych zakłóceń na rozkład i wielkość składowych mikronierówności, lecz jak dotąd nie opracowano jednego modelu uogólnionego [1÷5]. Uwzględniając skalę, w jakiej dane zjawisko występuje podczas tworzenia powierzchni, można wyróżnić modele w mikro i makroskali.

Modelowanie powierzchni obrobionej w makroskali umożliwia uwzględnienie w opisie powierzchni makrogeometrii ostrza oraz wzajemnych przemieszczeń ostrza i przedmiotu obrabianego. Ślady współdziałania ostrza i przedmiotu obrabianego stanowią podstawowy element struktury geometrycznej powierzchni i są określane przez parametry chropowatości, falistości oraz wady powierzchni. Formowanie nierówności powierzchni jest procesem przestrzennym, trójwymiarowym. Rozważając nierówności poprzeczne i wzdłużne można model deterministyczny powierzchni opracować jako złożenie dwóch niezależnych modeli dwuwymiarowych. Model nierówności poprzecznych jest funkcją odwzorowania naroża ostrza wzdłuż tworzącej przedmiotu obrobionego, natomiast model nierówności wzdłużnych jest funkcją tworzoną w kierunku stycznym do wektora prędkości skrawania.

¹ Politechnika Koszalińska, 75-620 Koszalin, ul. Raławicka 15-17,

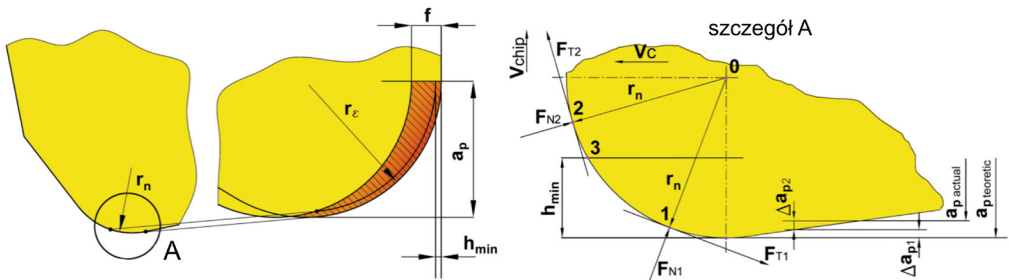


Rys. 1. Widok krawędzi skrawającej uzyskanej mikroskopem Nikon Eclipse MA200: a) węgiel spiekany powlekany 4215 $r_n = 30 \mu\text{m}$, b) polikrystaliczny diament CD10 $r_n = 10 \mu\text{m}$, c) polikrystaliczny azotek boru CB20 $r_n = 33 \mu\text{m}$ d) polikrystaliczny azotek boru powlekany CB7020 $r_n = 31,9 \mu\text{m}$

Rozpatrywanie procesu skrawania w mikroskali uwzględnia natomiast mikrotopografię krawędzi skrawającej. Ostrze skrawające w takim ujęciu nie jest idealnie ostre, lecz jest ostrzem technicznym, które charakteryzowane jest nie tylko przez zaokrąglenie krawędzi, ale także występujące na krawędzi nieciągłości w postaci pęknięć i wyszczerbień. Kształt krawędzi skrawającej wpływa na warunki oddzielania warstwy materiału w postaci wióra. Na rysunku 1 przedstawiono widok czterech różnych ostrzy skrawających wykonanych z różnych materiałów narzędziowych oraz wyniki pomiaru promienia zaokrąglenia krawędzi skrawających tych ostrzy. Pomiary wykonane zostały na mikroskopie Nikon Eclipse MA200 oraz zweryfikowane na profilometrze. W wyniku mierzenia badanych ostrzy uzyskano najmniejszą wartość promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej dla ostrzy diamentowych (na rysunku ostrze charakteryzuje się promieniem zaokrąglenia o wartości $10 \mu\text{m}$), natomiast stwierdzono, że dla ostrzy z polikrystalicznego azotku boru wartość zmierzonego promienia r_n przekracza $30 \mu\text{m}$.

3. EFEKT ZAOKRĄGLENIA KRAWĘDZI SKRAWAJĄCEJ

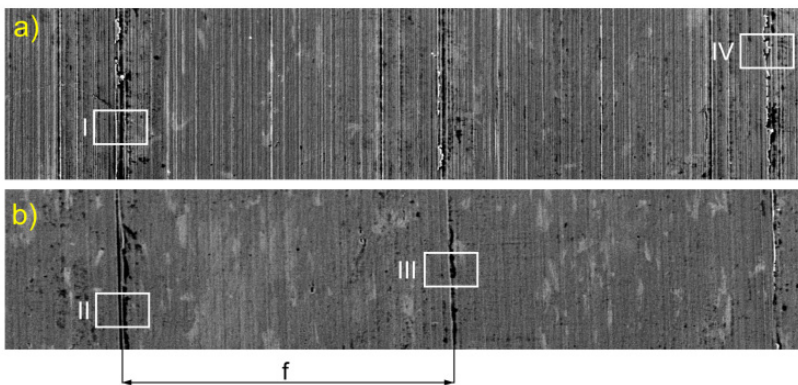
W przypadku ostrza teoretycznego, gdzie promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej jest zerowy, nie występuje problem minimalnej grubości warstwy skrawanej. Ostrze w postaci klina rozdziela materiał na część przynależną do wióra oraz tworzącą powierzchnię obrobioną. Natomiast w przypadku ostrza technicznego, które charakteryzuje się zaokrągleniem krawędzi skrawającej, oddzielanie warstwy materiału w postaci wióra następuje dla grubości warstwy skrawanej materiału większej od wartości minimalnej (punkt 2 rys. 2). Minimalna grubość warstwy skrawanej wyznaczana jest przez punkt na ostrzu, w którym siły styczne działające na ostrze zaczynają mieć zwrot zgodny z kierunkiem spływu wióra [1]. Minimalną grubość warstwy skrawanej można wyznaczyć teoretycznie lub doświadczalnie. Przykłady rozważań teoretycznych oraz wyniki badań eksperymentalnych można znaleźć w pracach wielu ośrodków naukowych w Polsce [1÷5].



Rys. 2. Model oddzielania materiału w toczeniu ostrzem o zaokrąglonej krawędzi skrawającej [6]

Warstwa położona poniżej minimalnej wartości grubości warstwy skrawanej podlega silnym deformacjom plastycznym. Można ją podzielić na dwie strefy – strefę z dominującymi naprężeniami normalnymi do powierzchni i strefę z dominującymi naprężeniami stycznymi. Materiał ze strefy, w której naprężenia styczne są większe od normalnych, przemieszcza się pod ostrzem. Natomiast strefa z dominującymi naprężeniami normalnymi wpływa na wielkość umocnienia warstwy przed ostrzem i w zależności od właściwości materiału obrabianego może tworzyć powierzchnię obrobioną lub zamienić się w wiór [6].

Grubość warstwy skrawanej zmienia swoją wartość od wartości posuwu do zera. Przekrój, w którym grubość warstwy skrawanej równa jest wartości minimalnej wyznacza punkt, w którym jednostkowa siła posuwowa zmienia znak i powoduje odpychanie materiału od ostrza w kierunku przeciwnym do posuwu [7]. Materiał ten przykleja się do nowo tworzonej powierzchni pogarszając jej jakość. Jest też główną przyczyną bocznego płynięcia materiału, które jest definiowane jako przemieszczenie materiału w kierunku przeciwnym do posuwu, w ten sposób, że tworzą się bruzdy na zboczach nierówności zdeterminowanych kształtem narzędzia (rys. 3).



Rys 3. Obserwowane zjawisko bocznego płynięcia materiału obrazach SEM stali EN 41Cr4 (54HRC) 0,43% C, 0,07% Ni, 0,92% Cr, 0,63% Mn, 0,24% Si dla $v_c = 165$ m/min, $f = 0,15$ mm/obr i $a_p = 0,2$ mm oraz a) ostrza CB20, b) CB7020

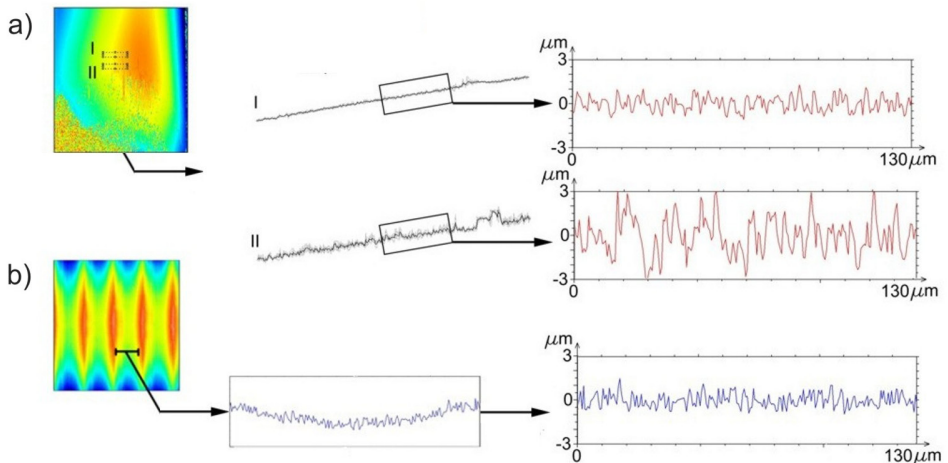
Duży ujemny efektywny kąt natarcia dla ostrzy PCBN powoduje wzrost siły płużącej i większą chropowatość powierzchni obrobionej. Na rysunku 3 widoczne jest zawijanie materiału oraz postrzępione grzbiety nierówności w obszarze śladów posuwu, gdzie plastycznie zdeformowany materiał jest bruzdowany na zewnątrz. Boczne płynięcie materiału obrabianego jest spowodowane wysoką temperaturą i ciśnieniem w strefie skrawania – materiał obrabiany w kontakcie z materiałem ostrza zachowuje się jak lepki płyn (rys. 3 II).

Natomiast hartowanie stali ogranicza jej zdolność do plastycznego płynięcia, gdyż wzrost właściwości wytrzymałościowych stali hartowanych związany jest z obniżeniem ich właściwości plastycznych. Powoduje to zmniejszenie ilości bruzdowanego materiału (rys. 3 III i IV).

3. EFEKT MIKROTOPOGRAFII KRAWĘDZI SKRAWAJĄCEJ OSTRZA

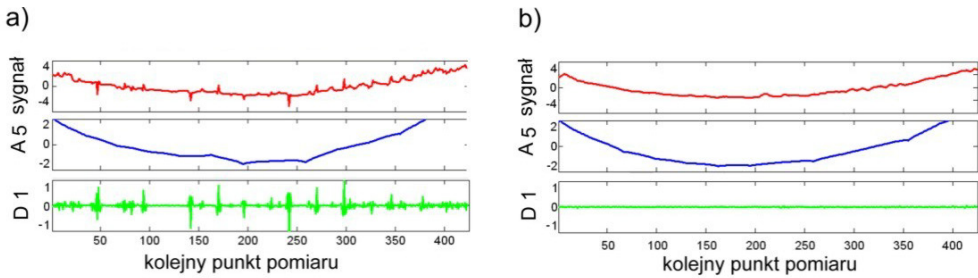
Poza zaokrągleniem krawędzi skrawającej, jednym z głównych czynników wpływających na ukształtowanie topografii powierzchni w mikroskali mikrotopografia krawędzi skrawającej, gdyż to ona bezpośrednio odwzorowuje się w podstawowym kształcie powierzchni obrobionej. Ten podstawowy element struktury geometrycznej powierzchni po toczeniu definiowany jest ze względu na powtarzalność profilu w odstępach posuwu, jako wyodrębniona część profilu o długości równej wartości posuwu w ten sposób, że utworzony zostaje „obrys zarysu ostrza” – podstawowy kształt mikronierówności (rys. 4). Obserwując proporcje wysokości mikronierówności do długości podstawowego kształtu mikronierówności – 5 μm wysokości do 150 μm wartości posuwu – zauważyć można, że jest to małe, prawie płaski fragment ostrza, który odwzorowuje się na powierzchni.

Na rysunku 4a przedstawiono pomiary powierzchni czynnej krawędzi skrawającej. Uśredniony profil powierzchni zebrany na zaokrągleniu (rys. 4a II) oraz w pewnym oddaleniu od strefy intensywnego zużycia (rys. 4a I) wskazują na istotne różnice ukształtowania powierzchni. Zmiana struktury geometrycznej powierzchni na zaokrągleniu krawędzi ostrza skrawającego na skutek procesów zużycia powoduje też zmiany w śladzie, jaki zostawia ostrze na powierzchni obrobionej. Zmiany te jednak są słabo zauważalne przez długi czas pracy ostrza i w sensie statystycznym uśredniony profil powierzchni długo nie zmienia się mimo obserwowanych zmian na powierzchni przyłożenia i natarcia ostrza. Zmiany w uśrednionym profilu obserwuje się dopiero, gdy następuje znaczne uszkodzenie krawędzi skrawającej, które powodując zmiany w makroskali widoczne jest też w opisie parametrycznym struktury geometrycznej powierzchni.



Rys. 4. a) Zestawienie pomiarów powierzchni krawędzi skrawającej ostrza CB7020: I – uśredniony profil wyznaczony na pomocniczej powierzchni przyłożenia, II – uśredniony profil na zaokrągleniu krawędzi skrawającej, b) zestawienie pomiarów powierzchni obrobionej dla stali hartowanej EN 41Cr4, uśredniony fragment profilu powierzchni oraz ten sam uśredniony profil po usunięciu kształtu

Analiza profilu podstawowego kształtu powierzchni utworzonych przez różne ostrza – CB20 i CB7020 wskazuje na to, że każda z powierzchni charakteryzuje się niewielkim, charakterystycznym dla niej rozkładem mikronierówności (rys. 5). Badając strukturę tych mikronierówności, ich rozkład w obrębie podstawowego kształtu mikronierówności, można próbować dokonać ilościowego rozróżnienia charakteru zmian obserwowanych na powierzchni. Dla powierzchni utworzonej przez ostrze CB20 widoczna jest większa zmienność w obrębie całego profilu, natomiast dla powierzchni utworzonej przez ostrze CB7020 zmienność ta jest mniejsza i rozłożona z różnym natężeniem.



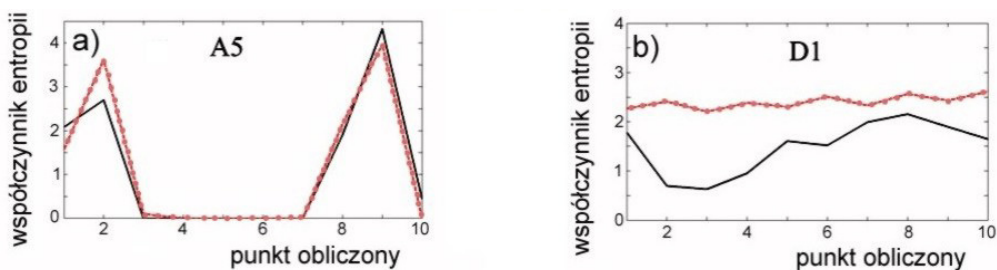
Rys. 5. Składowa $D1$ i $A5$ dekompozycji podstawowego kształtu mikronierówności za pomocą dyskretnej transformacji falkowej dla a) CB20, b) CB7020

Na rysunku 5a i rysunku 5b zestawiono fragmenty dwóch profili powierzchni po toczeniu stali hartowanej EN 41Cr4 ostrzami CB20 i CB7020 oraz po dwie składowe – aproksymacji $A5$ oraz szczegółów $D1$ dyskretnej transformaty falkowej. Analiza składowych ujawnia w przypadku obu powierzchni, znaczne podobieństwo wektora składowej aproksymacji $A5$. Jest on zgrubną wersją podstawowego kształtu mikronierówności. Wykres współczynników wektora składowych szczegółów $D1$ wykazuje znaczne różnice. W przypadku kształtowania powierzchni ostrzem niepowlekanym CB20 powierzchnia charakteryzowała się dużym udziałem składowych wysokoczęstotliwościowych. Dla powierzchni ukształtowanej przez ostrze powlekanie CB7020 składowe wyższych skal mają charakter bardziej zdeterminowany.

Przeanalizowano składowe falkowe $A5$ i $D1$ profili badając ich uporządkowanie. Metodologia wyznaczania współczynnika entropii dla podstawowego kształtu mikronierówności polegała na uśrednieniu danych profilu dla wielkości 0,01 mm (20 niezależnych zbiorów danych). Następnie uśrednione wartości odcinka profilu podzielono na 10 odcinków elementarnych ($10 \times 0,015 \text{ mm} = 0,15 \text{ mm}$), dla których wyliczono wartość współczynnika entropii Shannona.

Połączenie punktów współczynnika entropii dla poszczególnych składowych opisuje zawartość informacyjną procesu mikroskrawania (rys. 6). Większe wartości współczynnika entropii odpowiadają większej niepewności obecnej w procesie, gdyż wartość 0 współczynnika entropii możliwa jest do osiągnięcia tylko w przypadku danych zdeterminowanych. Największa wartość współczynnika możliwa jest do osiągnięcia w przypadku równego prawdopodobieństwa wszystkich danych powierzchni (przebieg losowy).

Dla wektora składowej aproksymacji $A1$ (rys. 6a) wyniki rozkładu entropii wzdłuż podstawowego kształtu nierówności są prawie identyczne. Dla wektora składowych szczegółów $D1$ (rys. 6b) entropia w zakresie całego profilu dla powierzchni ukształtowanej przez ostrza CB7020 jest niższa. Świadczy to większym zdeterminowaniu wektorów składowych szczegółów tej powierzchni.



Rys. 6. a) wartość współczynnika entropii dla wektora aproksymacji $A5$, b) wartość współczynnika entropii dla wektora szczegółów $D1$, linia czerwona kreskowa – CB20, linia czarna ciągła – CB7020

Rozkład współczynnika entropii w obrębie podstawowego kształtu mikronierówności powierzchni jest informacją, jaką zapisuje ostrze na powierzchni obrobionej. Jeśli połączymy punkty współczynnika entropii, to między linią reprezentującą rozproszenie mikronierówności dla powierzchni utworzonej przez ostrze powlekane z nienaruszoną powłoką i ostrze bez powłoki znajdują się krzywe odpowiadające za różne stany powłoki ostrza. Oznacza to, że rozkład współczynnika entropii wzdłuż podstawowego kształtu mikronierówności jest wskaźnikiem zjawisk mających miejsce na narożu. Jest więc on ilościowym wskaźnikiem jakości krawędzi skrawającej. Zmiana w zakresie kondycji powłoki, a w efekcie końcowym jej brak, powinny powodować rozkład współczynnika zbliżony do przypadku ostrza niepewlekanego. W obszarze między wartościami współczynnika entropii dla ostrza powlekanego i niepewlekanego powinna znaleźć się większość przypadków pośrednich, opisujących stan powłoki na ostrzu.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Podsumowując zagadnienia modelowania powierzchni w mikroskali można stwierdzić, że obejmują one zarówno zjawisko bocznego płynięcia materiału, jak i mikrotopograficzną nieregularność krawędzi skrawającej. Boczne płynięcie materiału występuje w każdym przypadku skrawania materiału plastycznego ostrzami technicznymi. Im bardziej podatny jest materiał, tym zjawisko jest lepiej obserwowalne na powierzchni, nie tylko na granicy śladu ostrza, lecz także między śladami. Zjawisko nasila się też w przypadku zużycia ostrza, gdy zwiększa się promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej i charakteryzuje się ona większą szczyrbaćnością (w pomiarach większą nieciągłością). Nieregularność powierzchni obserwowana jest w każdym przypadku skrawania, gdyż nie istnieje mikrotopografia krawędzi skrawającej bez losowych wyszczerbień i nierówności.

Mikrotopograficzna nieregularność powierzchni jest wynikiem wzajemnego oddziaływania materiału ostrza i materiału obrabianego. Im większa jest wzajemna siła oddziaływania, to zjawisko nasila się. Jest ono szczególnie widoczne w przypadku porównywania powierzchni, po skrawaniu tych samych powierzchni ostrzami różniąc-

cymi się cechami mikrotopograficznymi. Chropowatość krawędzi skrawającej jest determinowana przez rozmiar ziaren CBN oraz fakt, że powlekanie narzędzi PCBN o dużej twardości cienką warstwą TiN o mniejszej twardości zmienia jej właściwości w aspekcie zmniejszenia siły tarcia na styku wióra i powierzchni natarcia.

LITERATURA

- [1] STORCH B. (1989) *Wzajemne oddziaływanie naroża ostrza i materiału skrawanego*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- [2] ADAMCZAK S., JANUSIEWICZ A., MAKIEŁA W., STĘPIEŃ K., *Statistical validation of the method for measuring radius variations of components on the machine tool*; Metrology and Measurement System, 2011, Vol XVIII, No 1, 35-46.
- [3] GRZESIK, W. *Podstawy skrawania materiałów metalowych*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2010.
- [4] JANKOWIAK M., KAWALEC M., KRÓL G., *Analityczne określenie minimalnej grubości warstwy skrawanej dla różnych modeli składowych sił skrawania*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, z. 11, 1993, s 153-160.
- [5] ZAWADA-TOMKIEWICZ A., *Teoretyczne i doświadczalne podstawy monitorowania procesu toczenia z wykorzystaniem informacji o cechach stereometrycznych obrabianej powierzchni*, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej. Koszalin 2012.
- [6] STORCH B., ZAWADA-TOMKIEWICZ A., *Distribution of unit forces on the tool nose rounding in the case of constrained turning*. International Journal of Machine Tools & Manufacture Vol. 57 pp. 1-9 2012.
- [7] STORCH B., ZAWADA-TOMKIEWICZ A., *Distribution of unit forces on the tool edge rounding in the case of finishing turning*, Int J Adv Manuf Technol Vol. 60/5 pp.453-461, 2012.