

**Anna ZAWADA-TOMKIEWICZ**POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA  
ul. Raclawicka 15/17, 75-620 Koszalin**Zastosowanie optycznych technik pomiarowych do analizy topografii powierzchni obrobionej w toczeniu**

Dr inż. Anna ZAWADA-TOMKIEWICZ

Dr inż. Anna Zawada-Tomkiewicz pracuje jako adiunkt w Zakładzie Monitorowania Procesów Technologicznych Politechniki Koszalińskiej. Stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn, specjalność Metrologia uzyskała w 2002 roku. Jej zainteresowania naukowe to systemy wizyjne, sieci neuronowe, techniki wytwarzania i metrologia.



e-mail: anna.zawada-tomkiewicz@tu.koszalin.pl

**Streszczenie**

Artykuł zawiera analizę powierzchni obrobionej po toczeniu stali hartowanej. Bazując na modelu strefy skrawania został przeanalizowany obszar tworzenia chropowatości powierzchni. Zjawiska obserwowano przy zastosowaniu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) wraz z analizą składu oraz interferometru światła białego. Zdjęcia ostrza skrawającego zarówno od strony powierzchni przyłożenia, jak i natarcia przeanalizowano z punktu widzenia tworzenia powierzchni. Dokonano analizy zdjęć powierzchni oraz ilościowego porównania mikronierówności powierzchni po toczeniu z teoretycznym odwzorowaniem ostrza w materiale obrabianym.

**Słowa kluczowe:** toczenie stali hartowanej, model chropowatości powierzchni, metody optyczne.

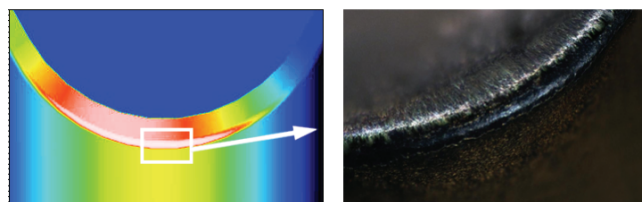
**The use of optical measuring techniques for the analysis of machined surface topography in turning****Abstract**

The article contains an analysis of machined surface after turning of hardened steel. The area of formation of surface roughness was analyzed based on the model of the machining zone [1]. Normalized unit force distribution on the rounded cutting edge indicates the presence, outside the chip formation and the creation of surface area, an area of dominant normal stress. This area takes part in the phenomenon of separation of the material. Depending on the elasto-plastic properties of work material at a given temperature (the ability to strengthen before the tool) the material from the zone of dominant normal stresses is burnished and flows under the tool causing the increase of the surface roughness. For hardened steel the plastic flow capacity is limited. This reduces the amount of material side flow, described also in [2-8]. The phenomenon was observed using scanning electron microscopy (SEM) [9] together with EDS analysis [10] and also with the use of white light interferometer [11-14]. Machined surface and tool wear in hard turning were particularly investigated in [15-21]. In this paper digital images of the cutting edge from flank and rake faces were analyzed from the perspective of creating a machined surface. An analysis of surface images was performed together with the quantitative comparison of surface asperities after turning to the theoretical roughness profile.

**Keywords:** hard turning, surface roughness model, optical methods.

**1. Wstęp**

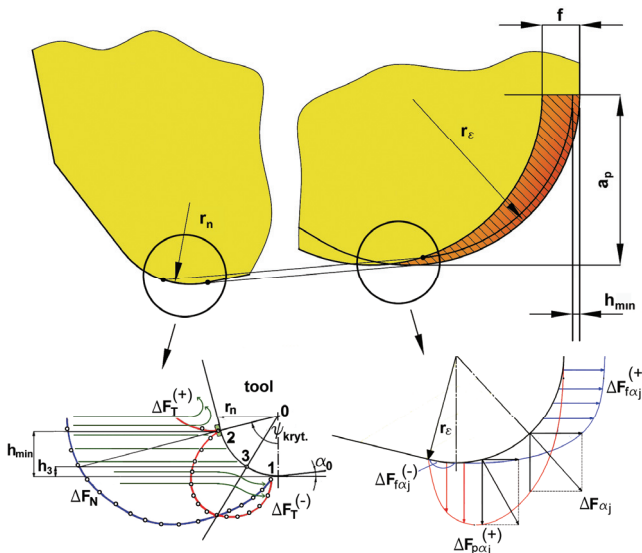
Obróbka skrawaniem polega na oddzielaniu warstwy materiału ostrzem o określonej geometrii. Ostrze skrawające nie jest idealnie ostre, lecz jest ostrzem technicznym, które posiada promień zaokrąglenia i jest poszczerbione. Uwzględnienie rzeczywistego kształtu ostrza skrawającego jest szczególnie istotne w obróbce precyzyjnej. Kształt krawędzi skrawającej wpływa na warunki rozdzielania warstwy materiału. Na rysunku 1 przedstawiono przykład ostrza o promieniu zaokrąglenia 32  $\mu\text{m}$ .



Rys. 1. Widok krawędzi skrawającej o promieniu zaokrąglenia 32  $\mu\text{m}$ . Zdjęcie uzyskane mikroskopem Nikon Eclipse MA200

Fig. 1. View of the cutting edge of radius 32  $\mu\text{m}$ . Picture obtained using the Nikon Eclipse MA200 microscope

Przykład skrawania ostrzem o zaokrąglonej krawędzi skrawającej przedstawiono na rysunku 2. Jeśli grubość warstwy skrawanej jest większa od wartości minimalnej, wtedy następuje oddzielenie warstwy materiału, który zamienia się w wiór. Minimalna grubość warstwy skrawanej wyznaczana jest przez punkt na ostrzu, w którym siły styczne działające na ostrze zaczynają mieć zwrot zgodny z kierunkiem splotu wióra [1].



Rys. 2. Model oddzielenia materiału w toczeniu ostrzem o zaokrąglonej krawędzi skrawającej

Fig. 2. Model of material separation in turning with the use of a tool of rounded cutting edge

Warstwa położona poniżej wartości minimalnej grubości warstwy skrawanej może także zamienić się w wiór w sprzyjających warunkach. Warstwa ta poddawana jest silnym deformacjom plastycznym. Jeśli przeanalizuje się typowy, znormalizowany rozkład sił normalnych i stycznych na zaokrągleniu krawędzi skrawającej, to można podzielić warstwę położoną poniżej wartości minimalnej na dwie strefy – strefę z dominującymi naprężeniami normalnymi do powierzchni i strefę z dominującymi naprężeniami stycznymi. Strefa, w której naprężenia styczne są większe od normalnych umożliwia przemieszczanie się warstwy skrawanej pod ostrzem. Przekrój poprzeczny materiału odpychanego w kierunku przeciwnym do posuwu można wyznaczyć biorąc pod uwagę obszar dominujących naprężeń normalnych. Natomiast strefa z dominującymi naprężeniami normalnymi wpływa na wielkość umocnienia warstwy przed ostrzem i w zależności od właściwości materiału obrabianego może tworzyć powierzchnię lub zamienić się w wiór.

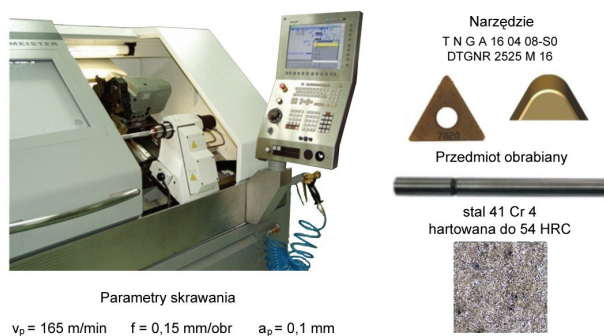
Zgodnie z założeniem, że krawędź skrawająca posiada ten sam promień zaokrąglenia, a właściwości materiału są te same dla tych samych warunków temperaturowych, wtedy minimalna grubość warstwy skrawanej ma tę samą wartość dla każdego przekroju wzdłuż całego naroża. Grubość warstwy skrawanej zmienia swoją 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. Materiał ten przykleja się do nowo tworzonej powierzchni pogarszając jej jakość. Materiał z bocznego płynięcia materiału jest twardy i o właściwościach ściernych, który zużywa się każdą powierzchnię wchodzącą z nim w kontakt.

Prezentowana praca dotyczy toczenia stali hartowanej ostrzami z polikrystalicznego azotku boru. Wcześniej na temat skrawania stali hartowanej ukazało się wiele prac [2-8]. Autorzy podkreślili korzystne właściwości materiałów ceramicznych w skrawaniu z małymi grubościami warstw skrawanych oraz trudności w uzyskaniu wymaganej gładkości powierzchni. Artykuł przedstawia zastosowanie skaningowej mikroskopii elektronowej i mikroskopu interferencji światła białego do pomiaru zjawisk na ostrzu skrawającym i powierzchni obrobionej.

## 2. Metodyka badań

Próby toczenia zostały przeprowadzone na obrabiarku NEF 400 o dużej sztywności. Próby przeprowadzono według zaleceń producenta narzędzi dla prędkości skrawania 165 m/min, posuwu 0,15 mm/obr i głębokości skrawania 0,2 mm (rys. 3).

Materiałem obrabianym była stal EN 41Cr4, zahartowana z temperatury 850°C. Twardość stali wyznaczono metodą Rockwella. Średnia twardość próbki wynosiła 54HRC. Skład chemiczny stali to 0,43% węgla, 0,07% niklu, 0,92% chromu, 0,63% manganu i 0,24% krzemu. W badaniach użyto wałki o średnicy 26 mm i długości 90 mm. Przed skrawaniem przedmiot obrabiany był specjalnie przygotowany, żeby ograniczyć inne wpływy poza zmiennymi w badaniach.



Rys. 3. Metodyka badań ostrza i powierzchni obrobionej  
Fig. 3. Research methodology of tool wedge and machined surface

W badaniach zastosowano ostrza z PCBN firmy Sandvik Coromant niepowlekanie i z cienką powłoką TiN (1  $\mu$ m). Materiał ostrza oznaczony był jako 7020 – z powłoką i CB20 – niepowlekanie. Płytki skrawające umieszczane były w oprawce nożowej DTG NR 2525 M 16. Próby toczenia przeprowadzono zostały bez użycia cieczy obróbkowej.

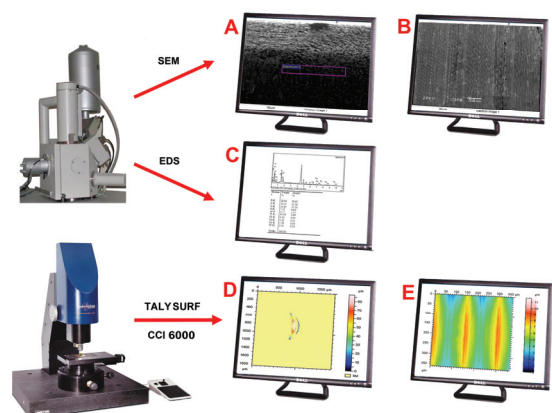
Zastosowane w badaniach płytki CBN posiadały oznaczenie ISO TNGA 160408 S01020. Geometria obu ostrzy była zbliżona (kąt ścinu – 20°, szerokość ścinu – 0,1 mm, promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej – 0,03 mm). Dla obu ostrzy krawędź skrawająca jest obszarem o zaokrągleniu zarówno wzdłuż naroża (zaokrąglone naroże  $r_{\epsilon}$ =0,8 mm) jak i również zaokrąglone jest przejście między powierzchnią przyłożenia i pierwszą powierzchnią natarcia – ścinem (zaokrąglona krawędź skrawająca  $r_n$ ). Analiza składu nowego ostrza niepowlekanego ujawniła w nim takie pierwiastki jak B, N, C, Ti (suma wagowa = 88%) oraz w mniejszych

ilościach Al, Co i W (suma wagowa = 12%). Analiza składu ostrza nowego powlekanego ujawniła powłokę TiN - Ti (75%) i N (25%).

## 3. Metodyka pomiarów

Metodyka pomiarów obejmuje analizę zdjęć uzyskanych zarówno w skaningowej mikroskopii elektronowej jak i w wyniku pomiaru wysokości mikronierówności metodą interferometrii światła białego.

Obraz oglądany w skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) nie jest obrazem rzeczywistym. Mapa obrazu powierzchni zawiera informacje o strukturze poziomów jasności. Parametry poziomów jasności obrazu powierzchni stanowią zbiór cech opisujących, w jaki sposób poszczególne punkty na powierzchni próbki emitują sygnały pod wpływem wiązki elektronów [9]. Mikroskopia skaningowa wykazuje korzyści w zakresie obserwowanych zarówno ostrza (rys. 4A) jak i powierzchni obrobionej (rys. 4B) – od możliwości obserwacji geometrii, przez analizę zjawisk zużycia aż po obserwację struktury materiału w dużych powiększeniach.



Rys. 4. Metodologia pomiarów ostrza i powierzchni obrobionej  
Fig. 4. Measurement methodology of tool wedge and machined surface

W mikroskopie skaningowym, który wyposażony jest w mikro-analizator rentgenowskiej dyspersji energii (EDS) można dokonać chemicznej analizy składu obserwowanego materiału. Analiza jakościowa dąży do ustalenia czy badany obszar próbki zawiera dane pierwiastki, w oparciu o występowanie lub brak ich charakterystycznych pików w widmie. Celem analizy ilościowej jest ustalenie stosunków zawartości pierwiastków na podstawie porównania intensywności odpowiednich pików tych pierwiastków pomiędzy sobą lub porównania z wzorcami. Gdy spektrometr wykryje impuls rentgenowski o energii charakterystycznej dla danego pierwiastka, to rejestruje punkt na analizowanym obszarze. W ten sposób, punkt po punkcie, powstaje mapa odwzorowująca rozmieszczenie tego pierwiastka w badanym obszarze. Obrazy rentgenowskie są prezentowane jako zestawienia, linie lub mapy w odcieniach szarości, pokazujące względną intensywność impulsu w każdym punkcie [10]. Analiza składu wspomaga mikroskopię skaningową w zakresie ujawniania mechanizmów zużycia (rys. 4A i 4C).

Obraz uzyskany interferometrem światła białego Talysurf CCI 6000 łączy zalety jakości obrazu uzyskanego w mikroskopie optycznym z możliwościami wzbogacenia opisu przez zdolność pomiarową profilometru. Zasada uzyskiwania obrazu w systemie polega na zastosowaniu złożonych algorytmów przetwarzania obrazu do łączenia obrazów prążków interferencyjnych, które uzyskiwane są na drodze interferencji dwóch wiązek światła padających na powierzchnię referencyjną i powierzchnię badaną. W rezultacie łączenia obrazów interferencji światła uzyskuje się obraz trójwymiarowy powierzchni [11]. Dane pomiaru wysokości można przedstawić w postaci symulacji fotograficznej, obrazu pseudokolorowego, map warstwicowych oraz można dokonać analizy danych powierzchni lub profilu [12-14]. Pomiar interferometrem CCI 6000 w zakresie geometrii ostrza uzupełnia go

o dane mikronierówności krawędzi skrawającej (rys. 4D), a w przypadku powierzchni obrobionej umożliwia jej kompleksową ocenę (rys. 4E).

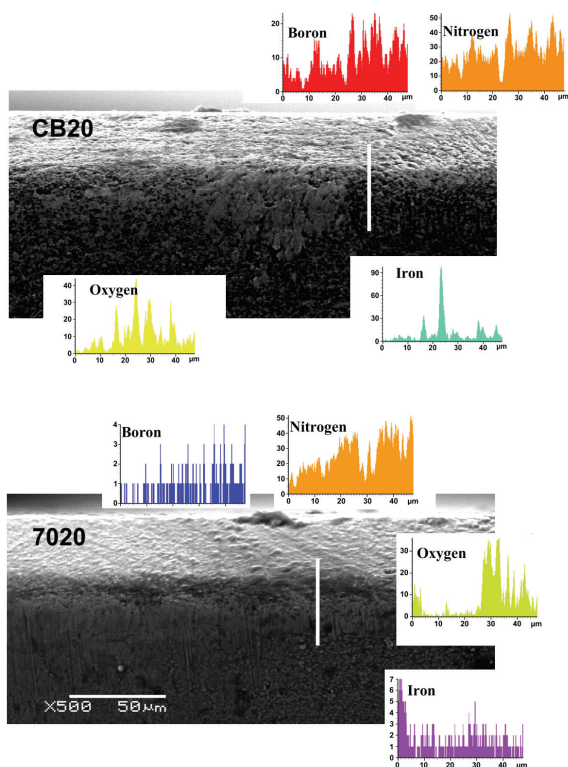
#### 4. Analiza zdjęć ostrza skrawającego

Warunki usuwania materiału są uzależnione od promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej, a chropowatość powierzchni jest tworzona przez zaokrągloną część krawędzi skrawającej. Dodatkowo struktura materiału narzędzia determinuje chropowatość powierzchni obrobionej, gdyż narzędzie wyciska ślad na powierzchni. Chropowatość krawędzi skrawającej jest determinowana przez rozmiar ziaren CBN.

Poulachon i inni [15] stwierdzają, że powlekanie narzędzi PCBN o dużej twardości cienką warstwą TiN o mniejszej twardości zmienia jej właściwości w aspekcie zmniejszenia siły tarcia na powierzchni natarcia.

Yellese i inni [16] oraz Pavel i inni [17] stwierdzili, że o jakości powierzchni decydują parametry skrawania oraz geometria ostrza i ukształtowanie krawędzi skrawającej. Zużycie ostrza zaczyna być dominujące w kształtowaniu powierzchni dla większych czasów skrawania, gdy jego wartość przekracza kryterium trwałości.

Kishawy i Elbestawi [18] stwierdzili, że deformacje krawędzi skrawającej narzędzia ze ścinem prowadzą do wzrostu efektywnego ujemnego kąta natarcia i wzrostu ciśnienia w strefie skrawania. Duży ujemny efektywny kąt natarcia powoduje wzrost siły płużącej i większą chropowatość powierzchni obrobionej.

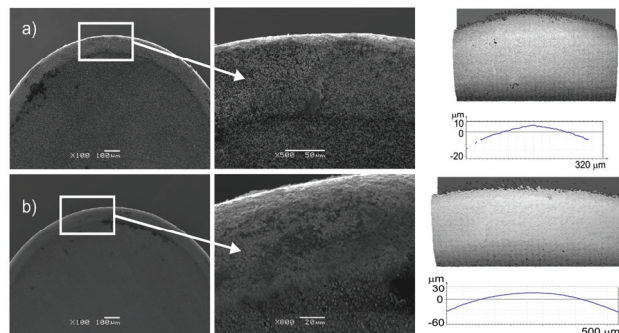


Rys. 5. Widok krawędzi skrawającej (SEM) z analizą EDS  
Fig. 5. View of the tool cutting edge (SEM) with EDS analysis

Na zdjęciach obu ostrzy (rys. 5) widoczne są ślady pracy narzędzia w postaci wytarć. Dla ostrza z powłoką TiN starcie warstwy jest znaczne. Na krawędzi skrawającej widoczny jest materiał podłoża.

Analiza EDS potwierdziła obecność materiału obrabianego w postaci nalepień na krawędzi i w mikronierównościach na ostrzu CB20. W przypadku ostrza 7020 obserwowano materiał obrabiany na granicy starcia warstwy oraz jako przylepiony do materiału podłoża (rys. 5).

Obserwacja powierzchni ścinu od strony powierzchni obrobionej (rys. 6) ujawniła niewielkie porysowania powierzchni oraz nalepiony materiał obrabiany. Krawędź skrawająca jest rozwinięta, a pomiary interferometrem światła białego wskazują na trudności z jej pomierzeniem.

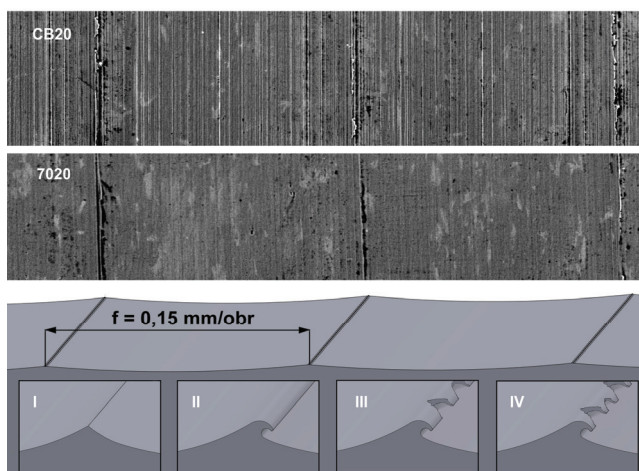


Rys. 6. Widok powierzchni natarcia, powiększony fragment powierzchni ścinu (SEM) oraz pomierzony fragment ścinu za pomocą CCI 6000 a) dla ostrza CB20, b) dla ostrza 7020

Fig. 6. View of the rake face, enlarged chamfer face (SEM) and chamfer face measured with the use of CCI 6000 a) for CB20 tool, b) for 7020 tool

#### 5. Analiza zdjęć powierzchni obrobionej

Duży promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej (dla ostrza CB20 – 32 µm, dla ostrza 7020 – 33 µm [19]) jest główną przyczyną boczego płynięcia materiału. Jest ono definiowane, jako przemieszczenie materiału w kierunku przeciwnym do posuwu w ten sposób, że tworzą się bruzdy na zboczach nierówności wyznaczonych przez kształt narzędzia (rys. 7). Liu i Melkote [20] próbowali dokonać ilościowej oceny boczego płynięcia materiału, modelując jego wpływ na chropowatość powierzchni w procesie mikrotoczenia. Podsumowali swoje rozważania stwierdzeniem, że można przypisać boczne płynięcie materiału umocnieniu materiału obrabianego ostrzem. Procent błędów predykcji chropowatości powierzchni na podstawie modelu osiągnięto na poziomie 15%. Ich badania potwierdzają znaczący wpływ boczego płynięcia materiału w przypadku kształtowania nierówności z małymi posuwami.



Rys. 7. Model boczego płynięcia materiału oraz obserwowane zjawisko na obrazach SEM

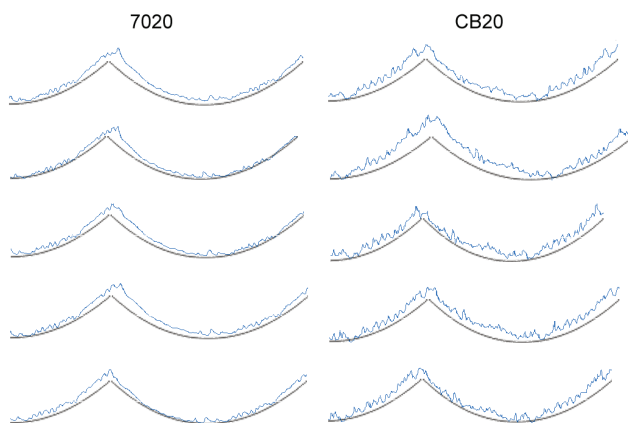
Fig. 7. The model of material side flow and observed the phenomenon in SEM images

Boczne płynięcie materiału jest wadą powierzchni. Jest obserwowane 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. 7 II).

Niemniej jednak hartowanie stali ogranicza jej zdolność do plastycznego płynięcia, gdyż wzrost własności wytrzymałościowych stali hartowanych związany jest bezpośrednio z obniżeniem ich własności plastycznych. Powoduje to zmniejszenie ilości materiału odkładanego w postaci bocznego płynięcia (rys. 7 III i IV).

Deformacje wynikające z bocznego płynięcia obserwowane są nie tylko wzdłuż śladów posuwu, lecz także między nimi. Dodatkowo wszelkie nierówności krawędzi skrawającej powodują, że plastyczne płynięcie materiału wypełnia nierówności i nadmierny materiał jest wypychany na boki.



Rys. 8. Zestawienie teoretycznych i eksperymentalnych (CCI 6000) profili powierzchni po toczeniu na twardo

Fig. 8. Composition of theoretical and experimental (CCI 6000) surface profiles after hard turning

Obserwacje zdjęć SEM wskazują na fakt, że rozwinięcie śladów zużycia ostrza na powierzchni przyłożenia w postaci rowków jest w części kopiowane na nowo powstałą powierzchnię. Dodatkowo badanie ostrzy i powierzchni obrabianej ujawniło płynięcie boczne materiału, szczególnie intensywne w przypadku ostrza niepowlekanego.

Zestawione na rysunku 8 profile powierzchni obrabianej zebrano przy zastosowaniu CCI 6000 przedstawiono w skali wraz z teoretycznym śladem chropowatości powierzchni. Zestawione profile są wartościami uśrednionymi zebranych po każdych 10 sekundach skrawania. Jak daje się zaobserwować, ślad teoretyczny odbiega od danych eksperymentalnych. Dla ostrza powlekanego powierzchnia obrabiana jest bardziej gładka w zakresie mikrochropowatości. Jest to zgodne z obserwacjami przedstawionymi w [21], gdzie autorzy stwierdzają, że powłoka TiN obniża energię tarcia i średnią temperaturę skrawania, co wpływa korzystnie na jakość powierzchni obrabianej.

## 6. Podsumowanie i wnioski

Skrawanie na twardo z małymi grubościami warstw powoduje, że promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej odgrywa istotną rolę w tworzeniu chropowatości powierzchni oraz rozkładzie naprężeń w warstwie wierzchniej.

W pracy dokonano analizy zdjęć SEM ostrza w różnych powiększeniach w celu zobrazowania mechanizmów zużycia ostrza dla początkowego okresu skrawania stali hartowanej. Obserwowano zmianę mikrogeometrii ostrza oraz mechanizmy zużywania się ostrza. Zestawione przekroje obrazu krawędzi skrawającej potwierdziły stekstrowanie charakterystyczne dla materiału ostrza i powłoki. Analiza składu wskazała obszary zwiększonego utleniania i rozmywania osnowy.

Zestawione zdjęcia SEM powierzchni obrabianej ujawniły boczne płynięcie materiału zarówno w przypadku skrawania ostrzem CB20 jak i 7020. Dla ostrza niepowlekanego boczne

płynięcie materiału było bardziej intensywne, większe też było rozwinięcie powierzchni oraz rysowanie i bruzdowanie.

## 7. Literatura

- [1] Storch B.: Zjawiska przykrawędziowe i monitorowanie chropowatości powierzchni po obróbce jednostrzowej, Monografie Wydziału Mechanicznego 124. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej 2006.
- [2] Kawalec M.: Skrawanie ostrzami zdefiniowanymi geometrycznie zahartowanych stali. Rozwój, efekty i tendencje. Obróbka skrawaniem 3. Bydgoszcz (2009) 9-30.
- [3] Jemielniak K.: Nowości w wysoko produktywnej obróbce skrawaniem. Obróbka Skrawaniem 2. Innowacje, Kraków (2008) 23-32.
- [4] Grzesik W.: Advanced Machining. Processes of Metallic Materials. Elsevier 2008.
- [5] Zawada-Tomkiewicz A.: Surface roughness produced by hard turning with PCBN tools. Proceeding of 7th International DAAAM Baltic Conference, Tallinn (2010), p. 275-278.
- [6] Zawada-Tomkiewicz A.: Zastosowanie Empirical Mode Decomposition do analizy zmian chropowatości w czasie skrawania. PAK nr 4 (2010), s. 326-329.
- [7] Oczó K.E., Liubimov V.: Struktura geometryczna powierzchni. Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej 2003.
- [8] Zawada-Tomkiewicz A., Storch B.: The analysis of the state of turned surface with the use of its image. Contact and Surface. WIT Press Southampton (2009) 97-104.
- [9] Teper E.: Podstawy mikroskopii skaningowej. www.kgmip.wnoz.us.edu.pl
- [10] Energy-dispersive x-ray microanalysis. NORAN Instruments 1989, cme.epfl.ch.
- [11] Lukianowicz Cz., Tomkowski R.: Analysis of topography of engineering surfaces by white light interferometry, 12th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Rzeszów (2009), s. 63-67.
- [12] Makiela W., Stępień K.: Ocena wpływu metodyki doboru falki bazowej na analizę falkową zarysów nierówności powierzchni. PAK nr 1 (2010), s. 32-34.
- [13] Adamczak S., Janecki D., Makiela W., Stępień K.: Eksperymentalna weryfikacja pomiaru elementów o zmiennej średnicy metodą promieniową. PAK nr 9 (2010), s. 1067-1070.
- [14] Grzesik W., Brol S., Zak K.: Ocena chropowatości powierzchni 2D i 3D po toczeniu różnych materiałów konstrukcyjnych. PAK nr 1 (2010), s. 44-45.
- [15] Poulachon G., Bandyopadhyay B.P., Jawahir I.S., Pheulpin S., Seguin E.: Wear behavior of CBN tools while turning various hardened steels. Wear 256/3-4 (2004) 302-310.
- [16] Yallesc M.A., Chaoui K., Zeghib N., Boulanouar L., Rigal J.-F.: Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool. Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) 1092-1104.
- [17] Pavel R., Marinescu I., Deis M., Pillar J.: Effect of tool wear on surface finish for a case of continuous and interrupted hard turning. Journal of Materials Processing Technology 170/1-2 (2005) 341-349.
- [18] Kishawy H.A., Elbestawi M.A.: Effects of process parameters on material side flow during hard turning. International Journal of Machine Tools and Manufacture 39/7 (1999) 1017-1030.
- [19] Zawada-Tomkiewicz A., Storch B.: Pomiar zużycia ostrza skrawającego interferometrem światła białego. PAK nr 8 (2010), s. 950-953.
- [20] Liu K., Melkote S.N.: Effect of plastic side flow on surface roughness in micro-turning process. International Journal of Machine Tools and Manufacture 46/14 (2006), p. 1778-1785.
- [21] Rech J., Moisan A.: Surface integrity in finish hard turning of case-hardened steel. International Journal of Machine Tools and Manufacture 43 (2003), p. 543-550.