

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

ANALIZA WARTOŚCI SIŁY SKRAWANIA PODCZAS TOCZENIA STALI HARTOWANEJ W WARUNKACH MAŁYCH PRZE - KROJÓW WARSTWY SKRAWANEJ

Streszczenie

Temat artykułu obejmuje analizę składowych siły skrawania podczas toczenia stali hartowanej w warunkach obróbki wykończeniowej. Przeprowadzone badania dotyczyły analizy składowych siły skrawania i chropowatości powierzchni obrabianej w przypadku, gdy warstwa skrawana miała wartość mniejszą niż promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej (mikroskrawanie, skrawanie cienkich warstw). Analiza rozkładu sił w narożu ostrza skrawającego pozwoliła na wyznaczenie minimalnej grubości warstwy skrawanej oraz ewaluację zjawiska bocznego płynięcia materiału.

Słowa kluczowe: *mikroskrawanie, minimalna grubość warstwy skrawanej*

ANALYSIS OF COMPONENTS OF THE CUTTING FORCE DURING TURNING OF HARDENED STEEL UNDER CONDITIONS OF FINISHING TREATMENT

Abstract

The subject of the study is an analysis of components of the cutting force during turning of hardened steel under conditions of finishing treatment. The conducted research was concerned with analysis of components of the cutting force and the machined surface roughness in case when the machined layer had a lower value than the curve radius of the cutting edge (microcutting, thin layer cutting). The analysis of distribution of forces in the corner of the cutting blade allowed to determine a minimum thickness of the machined layer and to evaluate the phenomenon of material side flow.

Keywords: *microcutting, machined layer minimum thickness*

ANALIZA WARTOŚCI SIŁY SKRAWANIA PODCZAS TOCZENIA STALI HARTOWANEJ W WARUNKACH MAŁYCH PRZEKROJÓW WARSTWY SKRAWANEJ

Anna ZAWADA-TOMKIEWICZ¹, Borys STORCH

1. WPROWADZENIE

Zagadnienia skrawania stali hartowanych o twardości powyżej 40HRC, przy zastosowaniu ostrzy z polikrystalicznego azotku boru (PCBN), coraz częściej są rozważane pod kątem możliwości zastąpienia nimi w niektórych zastosowaniach obróbek ściernych. Polikrystaliczny azotek boru, ze względu na odporność na temperaturę i zużycie dyfuzyjne, jest stosowany do skrawania stali hartowanych w obróbce wykończeniowej.

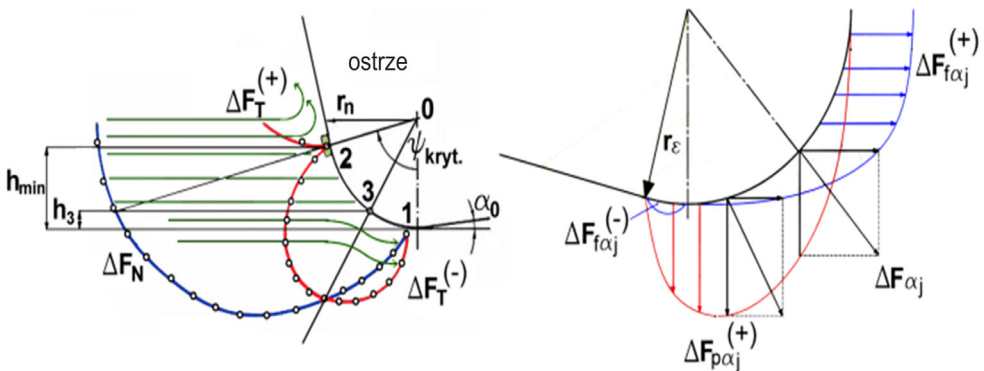
Usuwanie materiału zależne jest od promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej, a chropowatość powierzchni jest tworzona przez zaokrągloną część ostrza skrawającego. Rozkład sił jednostkowych na czynnej krawędzi skrawającej wpływa na jakość obrobionej powierzchni [1]. Stąd uznano za niezbędne szacowanie rozkładu sił jednostkowych dla danych warunków termodynamicznych skrawania.

Celem prowadzonych badań była analiza składowych siły skrawania podczas obróbki stali hartowanej w warunkach obróbki wykończeniowej. Przeprowadzone badania dotyczyły analizy składowych siły skrawania i chropowatości powierzchni obrobionej dla przypadku, w którym warstwa skrawana miała wartość mniejszą niż promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej (mikroskrawanie, skrawanie cienkich warstw). Analiza rozkładu sił jednostkowych w otoczeniu naroża ostrza skrawającego pozwala na wyznaczenie minimalnej grubości warstwy skrawanej oraz ewaluację zjawiska bocznego płynięcia materiału.

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

2. MODEL SKRAWANIA DLA MAŁYCH PRZEKROJÓW WARSTWY SKRAWANEJ

Większość uproszczeń w teorii obróbki skrawaniem zakłada, że ostrze jest idealnie ostre, gdy w rzeczywistości posiada ono pewne fizyczne stępienie w postaci jego zaokrąglenia. Rozkład sił jednostkowych na zaokrąglonej krawędzi skrawającej przedstawiono na rysunku 1. Rozpatrując zmienność grubości warstwy skrawanej materiału można zaobserwować, że oddzielanie warstwy materiału w postaci wióra nastąpi w przypadku, gdy wartość jej jest większa od wartości minimalnej.

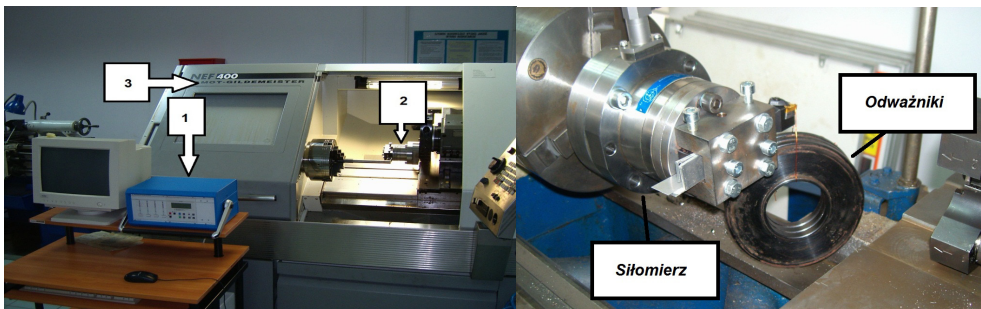


Rys. 1. Model oddzielania materiału w toczeniu ostrzem o zaokrąglonej krawędzi skrawającej

Analizując siły na zaokrągleniu krawędzi skrawającej w obszarze przejściowym, w którym ulega on deformacji na skutek przyłożonej siły, można stwierdzić, że stabilność procesu skrawania zanika wraz ze zmniejszaniem się grubości wióra (niezdeformowanej grubości warstwy skrawanej). Zdefiniować można punkt separacji jako punkt, w którym zanika proces tworzenia wióra oraz gdzie naprężenia od siły normalnej i stycznej są równe [1]. Materiał plastyczny po obu stronach punktu separacji będzie odsuwał się od tego punktu, natomiast naprężenia styczne powstające na styku ostrza będą przemieszczały materiał do tego punktu. Częstki materiału znajdujące się powyżej linii rozdziału deformowane są przez powierzchnię natarcia i tworzą wiór. Natomiast cząstki materiału poniżej linii są deformowane przez powierzchnię przyłożenia i nie są odrywane od przedmiotu. W ten sposób przebiega proces formowania wióra przez powierzchnię natarcia [1÷5]. Przejście z plastycznego wgniatania, w proces powodujący nawarstwianie się materiału przed ostrzem, można wyznaczyć analitycznie, badając wielkości geometryczne zaokrąglenia, współczynnik tarcia oraz rozkład składowych siły skrawania [6÷7].

3. METODYKA BADAŃ SKRAWANIA

Badania skrawania przeprowadzono na tokarce numerycznej NEF 400. W głowicy rewolwerowej, za pomocą narzędziowego uchwytu tokarskiego VDI 30, zamocowano siłomierz piezoelektryczny typu 9272 firmy Kistler, który umożliwił pomiar wartości składowych siły skrawania: obwodowej F_c , posuwowej F_f i odporowej F_p (rys. 2). Sygnały pomiarowe z siłomierza były przesyłane na kartę pomiarową KPCI 3108 przez wzmacniacz ładunku typu 5019 firmy Kistler i rejestrowane przy użyciu programu LabView. Kalibrację siłomierza przeprowadzono niezależnie dla trzech składowych siły skrawania. W wyniku kalibracji uzyskano charakterystykę siłomierza dla trzech składowych siły skrawania: $F_c = 395 U + 54$, $F_p = 125 U - 30$, $F_f = 300 U + 121$, U – wartość napięcia w mV.



Rys. 2. a) Stanowisko do pomiaru siły skrawania (1 – wzmacniacz ładunku 5019, 2 – siłomierz Kistler 9272, 3 – tokarka NEF400), b) wzorcowanie siłomierza

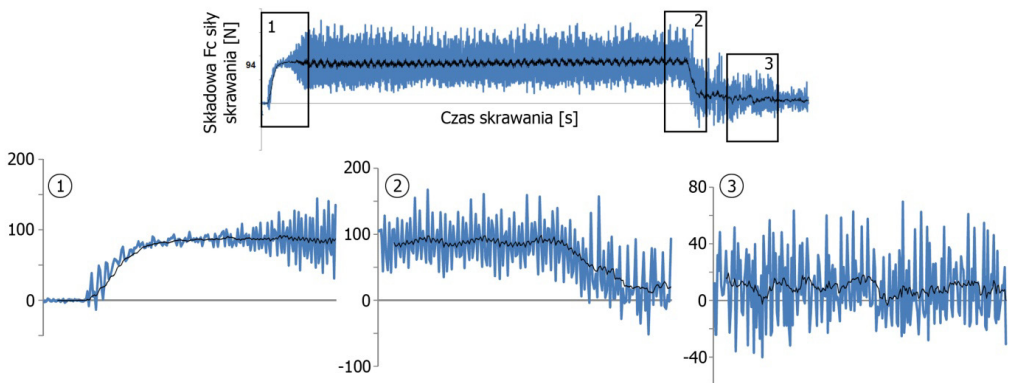
Badania wykonano na wałkach ze stali łożyskowej EN 100Cr6 o twardości 60 HRC. Twardość stali wyznaczono metodą Rockwella. Do obróbki stosowano ostrza PCBN (TNGA 160408 T01020B 7525 firmy Sandvik). W próbach toczenia wzdłużnego ustawiano dwie prędkości skrawania - 131 m/min oraz 262 m/min. Ze względu na to, że była to obróbka z małą grubością warstwy skrawanej, badania przeprowadzono na dwa sposoby. Pierwszy polegał na zmianie wartości głębokości skrawania w zakresie od 0,025 mm do wartości minimalnej głębokości skrawania (0,025 mm, 0,020 mm, 0,015 mm) i ustalonej wartości posuwu wzdłużnego 0,1 mm/obr. Drugi sposób polegał na zmianie posuwu wzdłużnego w zakresie od 0,025 mm/obr do 0,001 mm/obr (0,025 mm/obr, 0,020 mm/obr, 0,015 mm/obr, 0,010 mm/obr, 0,005 mm/obr, 0,003 mm/obr, 0,001 mm/obr) i ustalonej wartości głębokości skrawania.

Badania składowych siły przeprowadzono w warunkach mikroskrawania, dla którego grubość warstwy skrawanej była mniejsza od wartości promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej r_n . Pomiar topografii powierzchni odbył się na stanowisku po-

miarowym LEXT-OLYMPUS przy użyciu konfokalnego laserowego mikroskopu pomiarowego 3D OLS 4000.

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

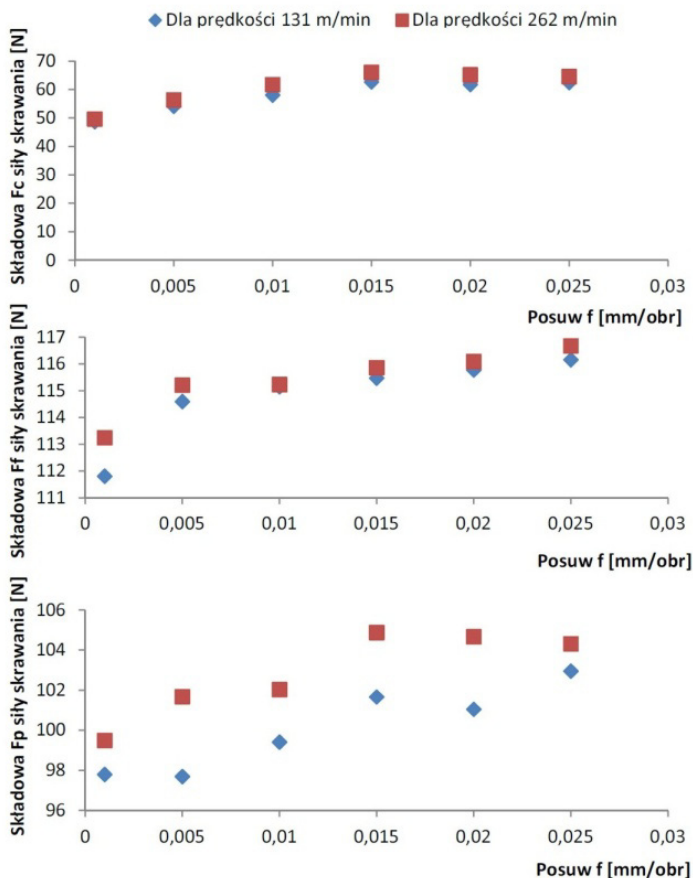
Podczas procesu skrawania rejestrowano przebieg składowych siły skrawania. Na rysunku 3 przedstawiono przebieg wartości składowej F_c siły skrawania. Siła stabilizuje się przy wartości 94 N. Jest to przebieg prawidłowy, bez zakleszczających się wiórów. Zaznaczono na nim trzy charakterystyki: 1 – wejście narzędzia w materiał, 2 – spadek siły po zatrzymaniu skrawania, 3 – brak skrawania.



Rys. 3. Przebieg wartości składowej obwodowej F_c siły skrawania dla głębokości skrawania a_p wynoszącym 0,1 mm oraz dla posuwu f wynoszącego 0,025 mm/obr

W momencie wchodzenia ostrza w materiał obrabiany następuje jego obciążenie, a mierzone wartości każdej ze składowych siły skrawania stopniowo narastają i stabilizują się w momencie pełnego obciążenia. Po wyjściu narzędzia z materiału obrabianego wartość mierzonej siły skrawania spada do zera.

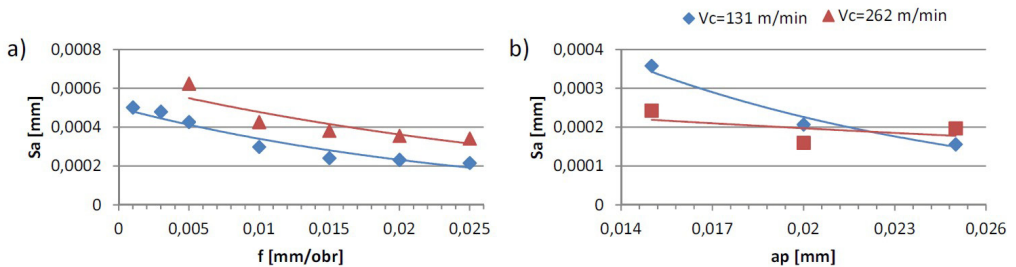
Dla dwóch prędkości skrawania i stałej wartości głębokości skrawania zarejestrowano wartości składowych siły skrawania. Zestawiono je na rysunku 4.



Rys. 4. Zestawienie wartości składowych siły skrawania w funkcji posuwu: a) składowa F_c siły skrawania, b) składowa F_f siły skrawania, c) składowa F_p siły skrawania

Przy zmianie posuwu zmieniają się jednocześnie: pole przekroju poprzecznego i grubość warstwy skrawanej. Wartości zmierzonych składowych siły skrawania dla mniejszych posuwów były mniejsze. I tak: składowa obwodowa F_c zmniejszyła się z 70 N do 50 N, posuwowa F_f z 117 N do 112 N, odporowa F_p z 106 N do 98 N. Zmiana wartości składowych siły skrawania nastąpiła na skutek zmiany przekroju warstwy skrawanej i mniejszego oporu skrawania. Zwiększenie pola przekroju poprzecznego wywołuje wzrost wypadkowego oporu skrawania. W efekcie ze wzrostem posuwu i stałej wartości głębokości składowe siły skrawania F_c , F_f , F_p wzrastają (łagodniej niż przy zwiększaniu głębokości a_p) i są zależne od stosunku f/a_p . W zakresie mniejszych posuwów dominuje efekt oporu właściwego. W przypadku

dużych posuwów znaczący wpływ na składowe siły skrawania ma przyrost pola przekroju warstwy skrawanej.

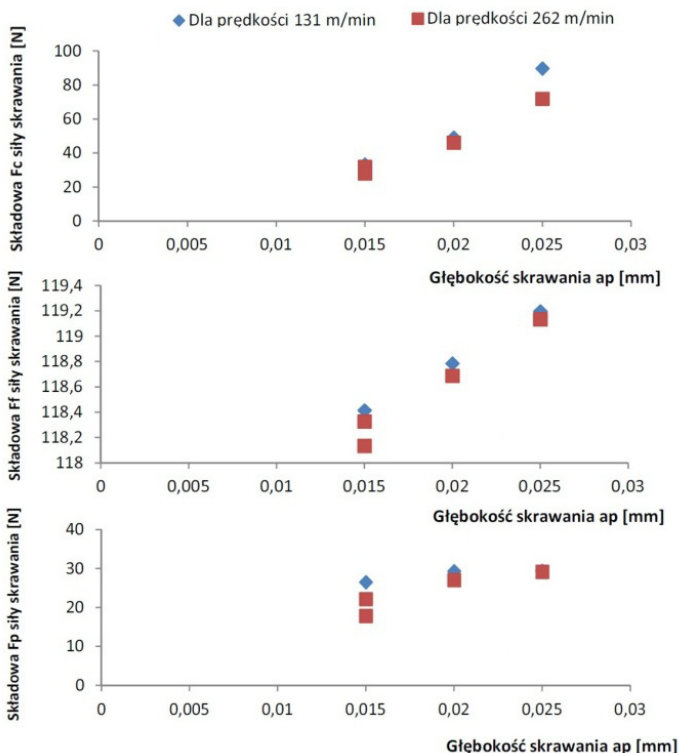


Rys. 5. Zależność parametru S_a chropowatości powierzchni a) od wartości posuwu przy stałej wartości głębokości skrawania wynoszącej 0,1 mm, b) od głębokości skrawania przy stałej wartości posuwu wynoszącego 0,1 mm/obr.

Pomierzono wartości parametrów chropowatości powierzchni obrabianej oraz wartości składowych siły skrawania. Stwierdzono, że zmniejszenie grubości warstwy skrawanej na skutek redukcji posuwu spowodował efekt, najpierw bocznego płynięcia materiału obrabianego, ograniczonego własnościami hartowanej stali, a następnie efekt dogładzania. Obniżenie grubości warstwy skrawanej na skutek zmniejszenia głębokości skrawania powodował efekt bocznego płynięcia materiału - większy dla większej głębokości skrawania i mniejszy dla mniejszej wartości, aż po zanik procesu skrawania.

Analiza parametrów chropowatości powierzchni obrabianej potwierdziła efekt bocznego płynięcia materiału dla mniejszych posuwów. Parametr wysokościowy chropowatości powierzchni S_a zwiększył swoją wartość przy mniejszych posuwach (0,3 μ m dla posuwu 0,025 mm/obr do 0,6 μ m dla posuwu 0,005 mm/obr, przy prędkości skrawania 262 m/min oraz 0,2 μ m dla posuwu 0,025 mm/obr do 0,4 μ m dla posuwu 0,005 mm/obr przy prędkości skrawania 131 m/min).

Dla stałej wartości posuwu wynoszącej 0,1 mm/obr zmniejszano głębokość skrawania, aż do momentu zaniku wióra. Zarejestrowane wartości składowych siły skrawania zestawiono w funkcji głębokości skrawania (rys. 6).



Rys. 6. Przebieg składowych siły skrawania od głębokości skrawania podczas toczenia stali EN 100Cr6 ostrzem z PCBN przy posuwie f wynoszącym 0,1 mm/obr. a) składowa F_c siły skrawania, b) składowa F_f siły skrawania, c) składowa F_p siły skrawania

Przy stałej wartości posuwu i zwiększania głębokości skrawania składowe siły skrawania F_c , F_f , F_p wzrastały z uwagi na to, że przy zachowaniu stałego oporu właściwego skrawania są one wprost proporcjonalne do pola przekroju warstwy skrawanej. Zmierzone wartości składowych siły skrawania były mniejsze dla mniejszych głębokości skrawania. Dla zmiany głębokości skrawania z 0,025 mm do 0,015 mm nastąpił spadek w wartościach składowej obwodowej F_c z 90 N do 20 N, dla składowej posuwowej F_f z 119 N do 118 N, dla składowej odporowej F_p z 30 N do 20 N. Analiza rozkładu parametrów chropowatości powierzchni dla mniejszej głębokości skrawania pozwoliła na obserwację wzrostu parametrów wysokościowych, w tym parametru chropowatości powierzchni S_a (rys. 5b). Przy zmniejszeniu głębokości skrawania z 0,025 mm do 0,015 mm charakter powierzchni zmienił się w ten sposób, że mimo dominującej składowej posuwowej, na skutek skrawania na granicy minimalnej grubości warstwy skrawanej, następowało skrawanie z dogładzaniem.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Ze względu na coraz powszechniejsze stosowanie mikroskrawania jako obróbki wykończeniowej, przebadano wartości składowych siły podczas skrawania cienkich warstw. Dla każdego z przypadków skrawania uzyskano, odpowiadające warunkom skrawania, wartości składowych całkowitej siły skrawania. Charakterystyczne było to, że wraz ze wzrostem głębokości skrawania, każda ze składowych siły skrawania wzrastała proporcjonalnie do pola przekroju warstwy skrawanej.

Przy analizie zależności siły skrawania od posuwu stwierdzono wzrost siły skrawania ze wzrostem wartości posuwu. Posuw jak i głębokość skrawania wpływają bezpośrednio na przekrój poprzeczny warstwy skrawanej, jednakże ich wpływ na siły skrawania nie jest jednakowy. Wzrost głębokości skrawania powoduje wzrost długości czynnej krawędzi skrawającej, proporcjonalny wzrost tarcia wewnętrznego i zewnętrznego, a w efekcie proporcjonalny wzrost siły skrawania.

Zmniejszenie głębokości skrawania z 0,025 mm do 0,020 mm, a następnie do 0,015 mm wpłynęło negatywnie na chropowatość powierzchni obrobionej. Podobnie zmniejszenie posuwu z 0,025 mm/obr do zera powodowało wzrost chropowatości. Bezpośrednią przyczyną tego efektu jest boczne płynięcie materiału, spowodowane powstaniem tzw. siły płużącej. Analiza rozkładu sił na narożu ostrza skrawającego umożliwia ograniczenie wpływu siły płużącej na jakość obrabianego przedmiotu. Wartość tej siły można oszacować znając składowe siły skrawania dla danych warunków obróbki, co z kolei umożliwia wyznaczenie rozkładu sił wzdłuż zaokrąglenia krawędzi skrawającej.

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 obrobionej 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.