

	Organizatorzy:	XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKİ ŚCIERNEJ Łódź - Uniejów 09-11.09.2015	
	Politechnika Łódzka		
	Wydział Mechaniczny		
• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn			

Model siły skrawania w procesie szlifowania obwodowego ceramiki inżynierskiej ze wspomaganie ultradźwiękowym

Cutting force prediction in ultrasonic assisted grinding of ceramic materials

MAREK KROK
JANUSZ PORZYCKI
JAKUB SZŁĘZAK *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.384

Artykuł prezentuje metodykę przewidywania siły skrawania w procesie szlifowania obwodowego ceramiki inżynierskiej ze wspomaganie ultradźwiękowym. Przedstawiono proces określania parametrów modelu związanych z właściwościami obrabianego materiału i mechanikę procesu oddzielania materiału w procesie szlifowania materiałów ceramicznych. Zaprezentowano również przykładowe obliczenia z wykorzystaniem opracowanego modelu dla wybranego przypadku technologicznego.

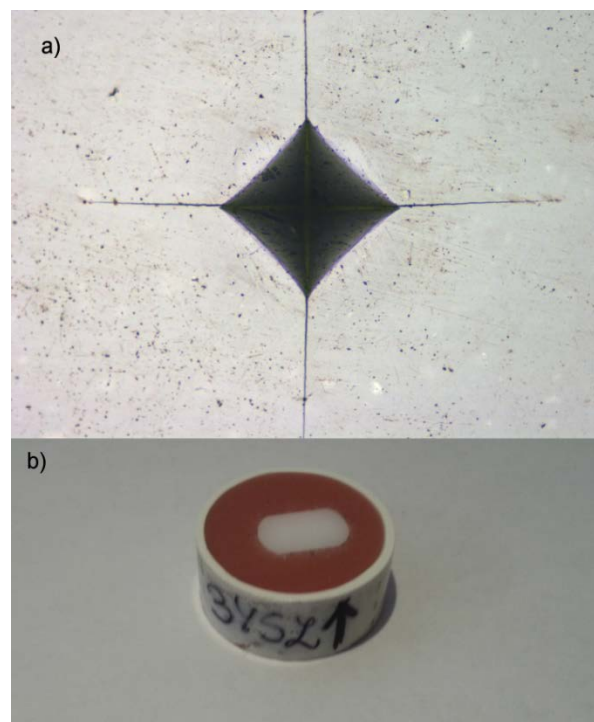
SŁOWA KLUCZOWE: modelowanie, obróbka ceramiki, szlifowanie, UAG

This paper presents a methodology to predict the cutting forces in the process of peripheral ultrasonic assisted grinding of technical ceramics. Also present is process of determining the model parameters related to the material properties of the workpiece. Describes is mechanics of the separation process of the material in the process of grinding ceramic materials. Also presented examples of model solutions for the case of technology.

KEYWORDS: modelling, ceramic machining, grinding, UAG

Ceramika inżynierska jest szeroko szosowana w różnych gałęziach przemysłu z uwagi na jej właściwości: mechaniczne, elektryczne czy też chemiczne (duża twardość, duża wytrzymałość, duża odporność na zużycie, chemiczna stabilność, itp.). Z drugiej jednak strony, głównie za sprawą dużej twardości i małej odporności na kruche pękanie, materiały ceramiczne należą do trudnoobrabialnych. Z tego powodu, do obróbki ceramiki mają zastosowanie różne techniki m. in. zaliczane do hybrydowych procesów obrób-

kowych. Jednym z przykładów takich procesów jest szlifowanie ze wspomaganie ultradźwiękowym (UAG). Do podstawowych zagadnień dotyczących analizy UAG należy zaliczyć modelowanie tych procesów. Mimo wielu prac z tego zakresu [2,3,4 i 5], dokładny opis procesów UAG wymaga dalszych wysiłków badawczych aby symulacja UAG była jak najbardziej zbliżona do procesów rzeczywistych.

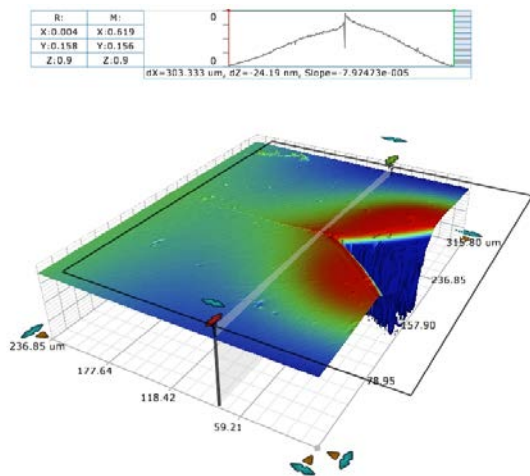


Rys. 1. Próbką wykonana z ceramiki cyrkonowej 3YSZ: a) widok pęknięcia powodowanego wgłębnikiem Vickersa, b) widok ogólny

* mgr inż. Marek Krok (mkrok@prz.edu.pl),
dr hab. inż. Janusz Porzycki (jpor@prz.edu.pl),
mgr inż. Jakub Szlęzak (jaszlezak@ur.edu.pl),

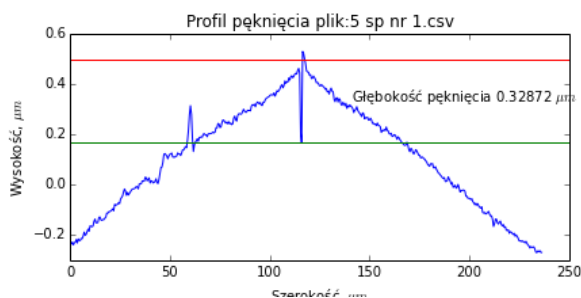
Określenie właściwości mechanicznych obrabianej ceramiki

W celu określenia właściwości mechanicznych obrabianych materiałów ceramicznych w zakresie parametrów występujących w procesie szlifowania, przeprowadzono badania statycznych materiałów koniecznych do przewidywania sił powstałych w procesie obróbki ceramiki ze wspomaganie ultradźwiękowym. Wykonano próbkę z ceramiki cyrkonowej modyfikowanej tlenkiem itru (rys. 1) Następnie wykonano szereg prób na twardościomierzu przy użyciu węgelnika Vickersa dla obciążenia 30kgf.



Rys. 2. Pomiar profilu porzecznego pęknięcia na profilometrze interferencyjnym firmy Bruker Contour GT-K

Na podstawie wykonanych na twardościomierzu pomiarów określono twardość, odporność na kruche pęknięcie, oraz długość pęknięć Palmqvista. Aby móc określić głębokość pęknięć przeprowadzono badania na mikroskopie skaningowym, gdzie na każdym z czterech pęknięć zmierzono profil w kierunku prostopadłym do pęknięcia (rys. 2). Następnie ze względu na dużą liczbę profili głębokości pęknięć opracowano program w języku Python z wykorzystaniem biblioteki NumPy w celu wsadowego przetwarzania wyników pomiarów (rys. 3).



Rys. 3. Wynik analizy danych z mikroskopu

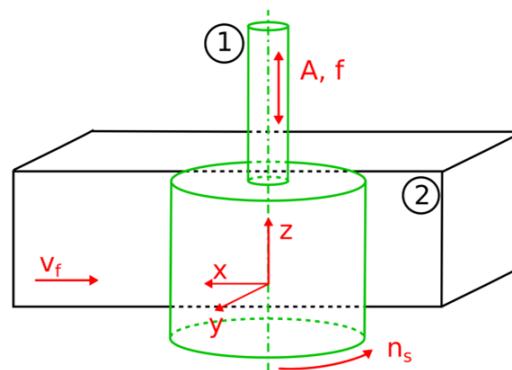
Na podstawie przeprowadzonych pomiarów opracowano statystycznie ich wyniki, które zostały zaprezentowane w tabeli 1.

Tab. 1. Właściwości ceramiki cyrkonowej 3YSZ

Właściwość	Wartość	Jednostka
Twardość HV30	12,29 ± 0,19	GPa
Odporność na kruche pęknięcie K_{IC}	4,362 ± 0,11	MPa * m ^{0,5}
Długość pęknięcia C_i	189,2 ± 13,5	um
Głębokość pęknięcia C_h	378 ± 32	nm

Określenie kinematyki ziarna ściernego w procesie szlifowania ze wspomaganie ultradźwiękowym

W procesie szlifowania ze wspomaganie ultradźwiękowym na trajektorię ziarna składają się trzy rodzaje ruchu: ruch posuwowy wzdłuż osi X (v_w – prędkość posuwu), ruch obrotowy wokół osi Z (n_s – prędkość obrotowa narzędzia), oraz ruch oscylacyjny wzdłuż osi narzędzia (A – amplituda drgań, f – częstotliwość drgań) (rys. 4).



Rys. 4. Kinematyka procesu szlifowania ze wspomaganie ultradźwiękowym: 1) ściernica, 2) przedmiot obrabiany.

Dla uproszczenia obliczeń przyjęto następujące założenia: ziarna ściernie rozłożone są w równomierny sposób na powierzchni cylindrycznej narzędzia (CPS), obrabiany materiał jest idealnie kruchy, parametry procesu obróbki ze wspomaganie ultradźwiękowym takie jak, amplituda i częstotliwość pozostają na stałym poziomie w trakcie obróbki, narzędzie oraz przedmiot obrabiany jest idealnie sztywny, ziarna ściernie posiadają jednakowy kształt i wymiary.

Trajektorię ruchu ziarna na powierzchni ściernicy opisuje się za pomocą przedstawionego poniżej układu równań parametrycznych w funkcji czasu.

$$x = (v_w + v_s)t \quad (1)$$

$$y = r - r \cos\left(\frac{v_s}{r}t\right) \quad (2)$$

$$z = A \sin(2\pi ft) \quad (3)$$

gdzie: v_w – prędkość posuwu przedmiotu, mm/min, v_s – prędkość skrawania, m/min, A – amplituda drgań ultradźwiękowych, um, f – częstotliwość oscylacji ultradźwiękowych, Hz, r – promień ściernicy, mm, t – czas, s.

Po wyznaczeniu pochodnych z równań (1-3) można obliczyć długość linii styku w czasie kontaktu ziarna ściernicy z przedmiotem obrabianym, to jest od 0 do t_k :

$$L = \int_0^{t_k} \sqrt{(v_w + v_s)^2 + (v_s \sin\left(\frac{v_s}{r}t\right))^2 + (2\pi f A \cos(2\pi ft))^2} dt \quad (4)$$

gdzie: L – długość linii styku ziarna z przedmiotem obrabianym, mm.

Czas styku pojedynczego ziarna z przedmiotem obrabianym t_k uwzględniający dosuw szlifowania, średnicę ściernicy oraz prędkość obrotową ściernicy, wyraża się zależnością (5):

$$t_k = \frac{\arccos\left(\frac{r - a_p}{r}\right)}{\frac{v_s}{r}} \quad (5)$$

gdzie: a_p – dosuw szlifowania, mm, t_k – czas kontaktu ziarna z przedmiotem obrabianym, s.

Średnia liczba ziaren ściernych na CPS

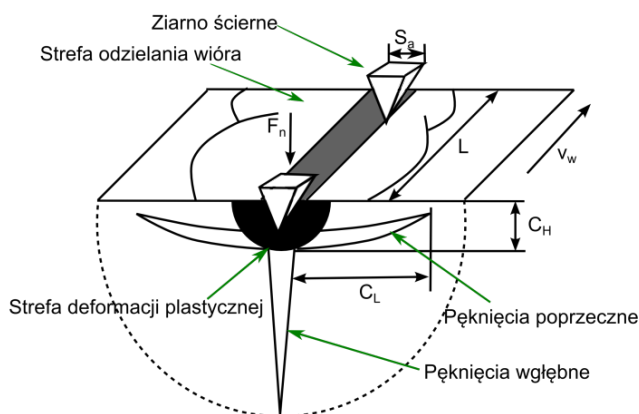
Liczba ziaren ściernych na powierzchni ściernicy w głównej mierze zależy od koncentracji ziaren ściernych w objętości ściernicy, średniego wymiaru ziarna oraz gęstości materiału ściernego. Średnią ilość ziaren na jednostkowej powierzchni ściernicy wyznaczyć można z poniższej zależności [2]:

$$N_{ds} = \left(\frac{0.88 \cdot 10^{-3} C_a}{(\sqrt{2}/3) S_a \rho \cdot 100} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

gdzie: N_{ds} – średnia liczba ziaren odniesiona do 1 mm^2 , mm^{-2} , C_a – koncentracja ziaren ściernych, S_a – średni wymiar ziarna, mm , ρ – gęstość materiału ściernego, g/mm^3 .

Mechanizm usuwania materiału

Głównym mechanizmem usuwania materiału w przypadku obróbki ceramiki inżynierskiej jest kruche pęknięcie [1]. Na rys. 5 przedstawiono pęknięcia dla materiału kruchego wywołane przez działanie ziarna ściernego.



Rys. 5. Schemat obróbki ceramiki jednym ziarnem ściernym

Długość pęknięcia C_L i głębokość pęknięcia C_H opisane w [1] wyraża się następującymi zależnościami:

$$C_L = C_1 \left(\frac{1}{\tan \beta} \right)^{\frac{5}{12}} \left(\frac{E^{\frac{1}{4}}}{H_v K_{IC} (1 - \nu^2)^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{1}{2}} (F_g)^{\frac{5}{8}} \quad (7)$$

$$C_H = C_2 \left(\frac{1}{\tan \beta} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{E^{\frac{1}{2}}}{H_v} (F_g)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

gdzie: C_L – długość pęknięcia, μm , C_H – głębokość pęknięcia, nm , C_1 i C_2 – bezwymiarowe stałe zależne od materiału i kształtu wglębniaka, β – pół kąt wierzchołkowy ziarna, deg , E – moduł Younga, GPa , F_g – siła wciskająca wglębniak, N .

Dla danego rodzaju ceramiki można równanie (7) i (8) zapisać w uproszczonej postaci, czyli:

$$C_L = C_{q1} (F_g)^{\frac{5}{8}} \quad (9)$$

$$C_H = C_{q2} (F_g)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

gdzie: C_{q1} – stała materiałowa, m/N , C_{q2} – stała materiałowa, m/N .

Objętość usuwanego materiału przez ściernicę w UAG uzyskuje się poprzez pomnożenie ilości materiału usuwanego jednym ziarnem ściernym przez liczbę ziaren ściernych na powierzchni styku ściernicy z przedmiotem obrabianym. Objętość ta jest określana przez poniższe wyrażenie:

$$V_f = 2 K C_L C_H L f N_{ds} b v_s t_k \quad (11)$$

gdzie: V_f – objętość usuwanego materiału, mm^3 , K – stała materiałowa, której wartość można określić dla danego przypadku technologicznego, N , b – szerokość skrawania, mm .

Całkowitą objętość materiału usuwaną w procesie szlifowania w odniesieniu do czasu styku pojedynczego ziarna ściernego z przedmiotem obrabianym można wyrazić w następujący sposób:

$$V = a_p b v_w t_k \quad (12)$$

Po wstawieniu do równania (11) zależności (9) i (10) oraz po przyrównaniu jej do wyrażenia (12), uproszczeniu i przekształceniu można wyznaczyć siłę dla jednego ziarna skrawającego.

$$F_g = \sqrt[9]{\left(\frac{v_w a_p}{2K C_{q1} C_{q2} f N_{ds} v_s L} \right)^8} \quad (13)$$

gdzie: F_g – siła skrawania jednym ziarnem ściernym, N .

Po przemnożeniu tej zależności przez liczbę ziaren na powierzchni ściernicy będącej w styku z przedmiotem obrabianym otrzymuje się zależność na siłę skrawania w procesie szlifowania ze wspomaganie ultradźwiękowym. Siła ta wyrażone jest następującą zależnością.

$$F_n = F_g N_{ds} b v_s t_k \quad (14)$$

gdzie: F_n – siła skrawania w procesie UAG, N ,

Wyznaczenie stałej materiałowej K

Na podstawie przeprowadzonego eksperymentu [6] dla danych przedstawionych w tabeli 2 wyznaczono stałą K przekształcając zależność (13) i upraszczając do następującej postaci:

$$K = \frac{v_w b t_k a_p}{F^{\frac{1}{9}} C_{q1} C_{q2} f L} \quad (15)$$

gdzie: F – siła skrawania będąca wynikiem pomiaru w procesie UAG, N ,

Tab. 2. Parametry eksperymentu

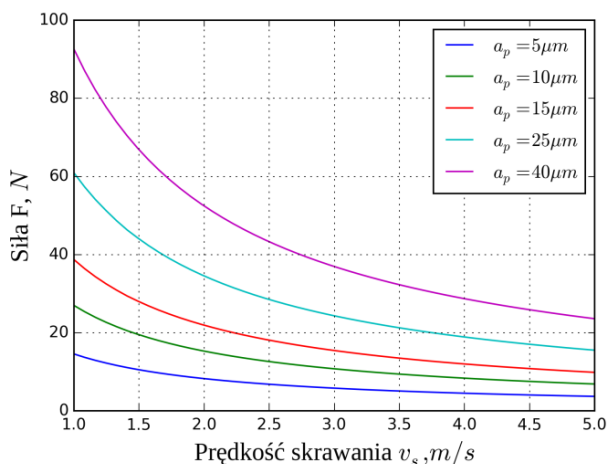
Właściwość	Wartość	Jednostka
Materiał obrabiany	3YSZ	-
Koncentracja ściernicy	75	-
Długość pęknięcia C_L	189,2 ± 13,5	μm
Głębokość pęknięcia C_H	378 ± 32	nm
Głębokość skrawania	30	μm
Posuw	300	mm/min
Szerokość skrawania	3	mm
Siła skrawania	32	N
Częstotliwość oscylacji	26.1	kHz
Amplituda oscylacji	2	μm
Średnica ściernicy	6	mm
Prędkość obrotowa	4000	obr/min

Zależności w procesie szlifowania ze wspomaganie ultradźwiękowym.

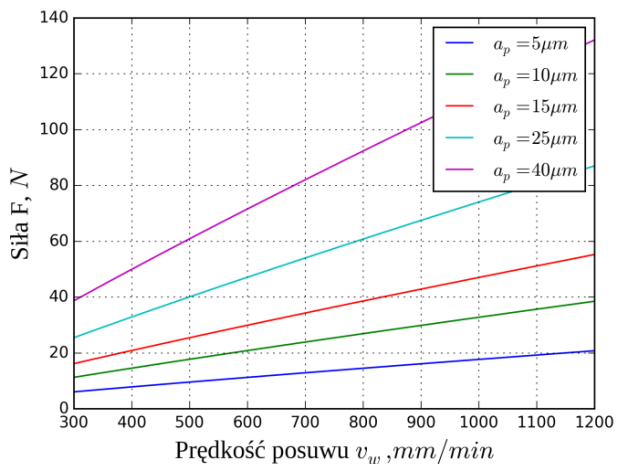
Opracowano program komputerowy w języku Python w celu iteracyjnego obliczania wartości modelu 14. W tabeli 3 podano podstawowe parametry, dla których przedstawiono wyniki modelu. Na rysunkach od 6 do 10 przedstawiono zależności odnośnie siły skrawania w funkcji parametrów procesu szlifowania ze wspomaganie ultradźwiękowym.

Tab. 3. Parametry dla modelu matematycznego

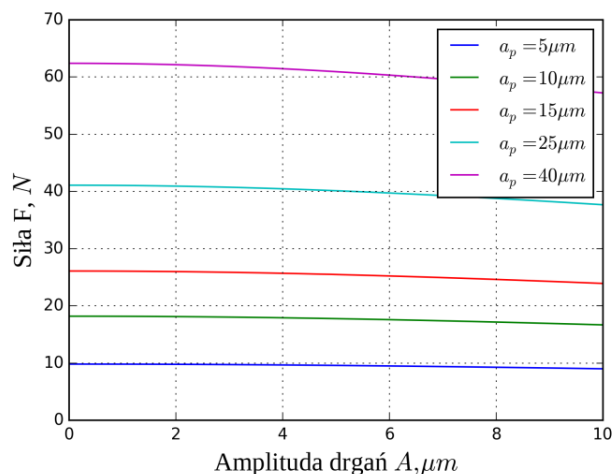
Właściwość	Wartość	Jednostka
Materiał obrabiany	3YSZ	-
Koncentracja ściernicy	100	-
Długość pęknięcia C_l	$189,2 \pm 13,5$	μm
Głębokość pęknięcia C_h	378 ± 32	nm
Głębokość skrawania	5 – 10 – 15 25 - 40	μm
Posuw	500	mm/min
Szerokość skrawania	5	mm
Częstotliwość oscylacji	21.5	kHz
Amplituda oscylacji	5	μm
Średnica ściernicy	8	mm
Prędkość obrotowa	6366	obr/min



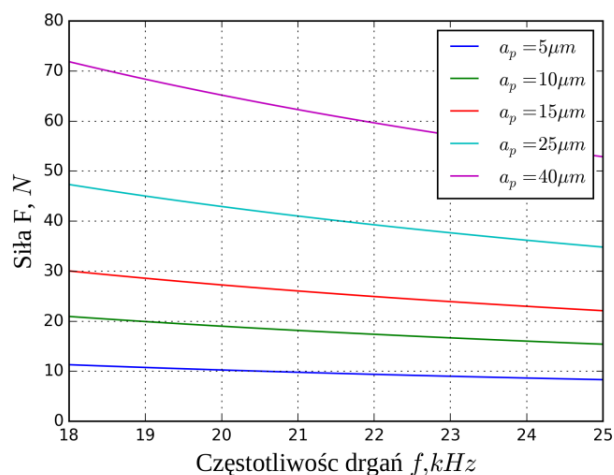
Rys. 6. Zależność siły od prędkości skrawania w zakresie v_s od 1.0 m/s do 5.0 m/s pozostałe parametry jak w tab. 3



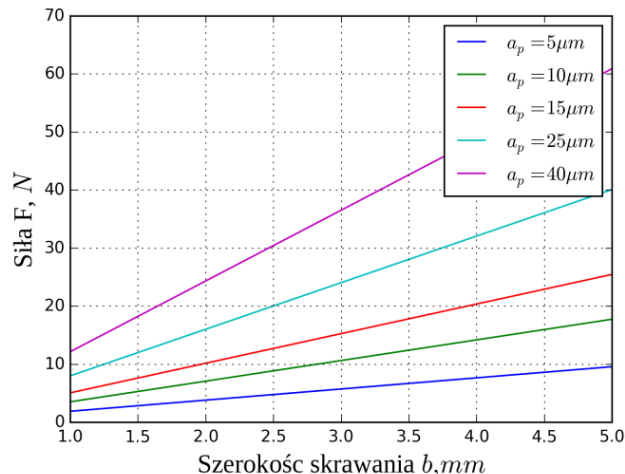
Rys. 7. Zależność siły od prędkości posuwu w zakresie v_w od 300 mm/min do 1200 mm/min pozostałe parametry jak w tab. 3



Rys. 8. Zależność siły od amplitudy oscylacji w zakresie A od 0 μm do 10 μm pozostałe parametry jak w tab. 3



Rys. 9. Zależność siły od częstotliwości oscylacji w zakresie f od 18 kHz do 25 kHz pozostałe parametry jak w tab. 3



Rys. 10. Zależność siły od szerokości skrawania w zakresie b od 1.0 mm do 5 mm pozostałe parametry jak w tab. 3

Podsumowanie

W artykule przedstawiony jest model siły skrawania w procesie szlifowania ceramiki cyrkonowej YSZ ze wspomaganie ultradźwiękowym. Model ten pozwala na oszacowanie tej siły w zależności od parametrów wejściowych procesu UAG. Porównanie wyników otrzymanych z modelu i uzyskanych drogą eksperymentu [6] wykazuje dużą zgodność

tych wyników, co umożliwia zastosowanie przedstawionego modelu do symulacji procesów szlifowania wybranej ceramiki inżynierskiej ze wspomaganie ultradźwiękowym.

Do badań głębokości pęknięć wykorzystano Profilometr optyczny, interferencyjny firmy Bruker Contour GT-K. Urządzenie zakupione w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Podkarpackiego na lata 2007-2013 przy współfinansowaniu z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

Artykuł stanowi częściowe przedstawienie wyników uzyskanych w realizacji projektu PBS2/B6/17/2013.

LITERATURA

1. Marshall D.B., Lawn B.R., Evans A.G., Elastic/plastic indentation damage in ceramic: the lateral crack system. *Journal of the American Ceramic Society* 65 (11) (661-666), 1982.
2. DeFu Liu, Cong W.L., Pei Z.J., YongJun Tang, A cutting force model for rotary ultrasonic machining of brittle materials. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 52 (77-84) 2012.
3. Yan Wang, Bin Lin, Xiaofeng Zhang, Research on the system matching model in ultrasonic vibration assisted grinding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 70 (449-458) 2014.
4. Chenglong Zhang, Jianfu Zhang, Pingfa Feng, Mathematical model for cutting force in rotary ultrasonic face milling of brittle materials. *Journal of Advanced Manufacturing Technology* 69 (161-170) 2013.
5. Yan Wang, Bin Lin, Shaolei Wang, Xiaoyan Cao, Study of ultrasonic vibration assisted grinding for hard and brittle materials processing. *Journal of Machine Tools & Manufacture* 77 (66-73) 2014.
6. Wdowik R., Analiza szlifowania ceramiki korundowej i cyrkonowej ze wspomaganie ultradźwiękowym. Rzeszów 2015