

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

Wpływ drgań oscylacyjnych przedmiotu obrabianego na głębokość szlifowania płaszczyzn

The impact of oscillating vibrations of the work-piece on the depth
of the flat grinding

GRZEGORZ BECHCIŃSKI
FRANCISZEK ORYŃSKI *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.338

W artykule zaprezentowano wpływ parametrów obróbki na rzeczywistą głębokość szlifowanych wgłębnie powierzchni płaskich. Badania doświadczalne przeprowadzono na szlifierce przystosowanej do szlifowania wibracyjnego prowadzonego z różnymi parametrami.

SŁOWA KLUCZOWE: szlifowanie wibracyjne płaszczyzn, badania eksperymentalne, stolik wibracyjny, rzeczywista głębokość szlifowania

The article presents the effect of processing parameters on the actual depth of the ground deep flat grinding. Experiments were carried out on a flat grinding machine adapted to vibration assisted grinding process conducted with different parameters.

KEYWORDS: vibration assisted grinding, experimental studies, vibratory table holder, effective grinding depth

Wprowadzenie

Struktura geometryczna powierzchni (SGP) obejmuje chropowatość, falistość, błędy kształtu i wady powierzchni. Ostatnią operacją kształtującą SGP funkcjonalnie ważnych elementów maszyn, w większości przypadków, jest obróbka ścierna. Umożliwia ona nadawanie wysokiej dokładności i małej chropowatości powierzchni, niezależnie od twardości obrabianego przedmiotu. Cechą charakterystyczną obróbek ściernych jest równoczesne oddziaływanie dużej liczby ostrzy ziaren ściernych na obrabianą powierzchnię. Ostrza ścierne mają różne wymiary, kształt i są rozmieszczone przypadkowo na czynnej powierzchni ściernicy (CPS). W procesie obróbki ścierniej występują różne procesy fizyczne.

Do głównych z nich należą: mikroskrawanie, odkształcanie plastyczne i tarcie [5]. Szlifowanie wibracyjne jako jeden z hybrydowych procesów obróbki ścierniej wykorzystywane może być do kształtowania struktury geometrycznej powierzchni. Jednocześnie, umożliwia podniesienie efektywności usuwania nadmiaru obróbkowego poprzez zwiększenie rzeczywistej głębokości skrawania. W tym procesie, przedmiot lub ściernica są wprawiane w drgania o określonej częstotliwości i amplitudzie. Drgania wspomagające wywołują zmiany kierunku prędkości szlifowania i mechanizmów kształtowania warstwy wierzchniej przedmiotu oraz zużycia ściernicy.

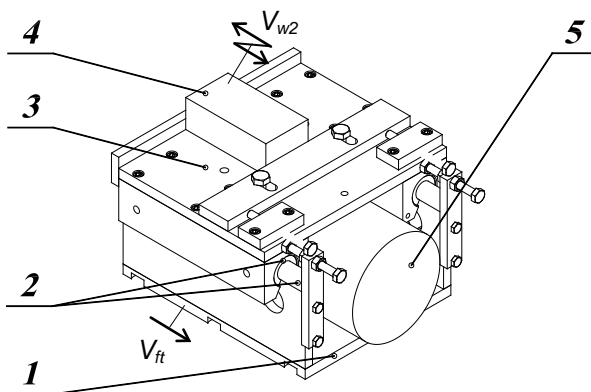
Dotychczas, stosowano różne metody oddziaływania na proces szlifowania. W badaniach [6] użyto ściernic rowkowanych do szlifowania wzdłużnego wałków, co pozwoliło zwiększyć intensywność chłodzenia i smarowania strefy szlifowania. Jednocześnie ziarna ściernie były bardziej obciążone i wykorzystane podczas skrawania. Wykazywały, w związku z tym, większą zdolność do samoostrzenia. Niestety, chropowatość powierzchni szlifowanej ściernicami rowkowanymi była dużo gorsza niż w przypadku stosowania tradycyjnej ściernicy. Natomiast przy wyiskrzaniu różnica w wartościach chropowatości była już nieduża. Inna metoda polegała na oczyszczaniu ściernicy strugą wodną pod wysokim ciśnieniem w celu usuwania wiórów i stępionych ziaren [8]. Opracowano również konstrukcję ściernicy z krawędzią zewnętrzną zawierającą ziarna diamentu ze spoiwem plastikowym oraz metalowym [7]. Drgania ultradźwiękowe przedmiotu [4] i [9] zastosowane w części cyklu szlifowania przyczyniły się do zwiększenia dynamiki kontaktu czynnej powierzchni ściernicy CPS z materiałem obrabianym na różnych głębokościach ziaren ściernych, przy wzajemnych odległościach porównywalnych z ich przeciętnymi wymiarami. Dynamika kontaktu sprzyjała wytwarzaniu złożonego stanu naprężeń w materiale obrabianym. Z ogólnej liczby ziaren rozmieszczonych na CPS, w tworzeniu wióra uczestniczyło tylko od 5 do 12%, a pozostałe trafiły

* dr inż. Grzegorz Bechciński (grzegorz.bechcinski@p.lodz.pl),
prof.dr hab. inż. Franciszek Oryński (franciszek.orynski@p.lodz.pl)

wie fragmenty wcześniej wykonanych rowków i w ograniczonym stopniu uczestniczyły w skrawaniu, co potwierdziła ilość klasycznych wiórów znajdująca się w produktach szlifowania, nieprzekraczająca 50%. Pozostałe produkty powstawały w procesie wrywania przy małych zagłębieniach lokalnych naroży ziaren i ich ślizgowym przemieszczeniu się względem obrabianej powierzchni. W warunkach granicznego mikroskrawania ziaren ściernych, tarcie stanowi 80% całkowitej energii procesu. Natomiast w przypadku ślizgania się ziaren ściernych po powierzchni materiału obrabianego, energochłonność procesu w 100% charakteryzowana jest przez pracę tarcia. Podobnie zaobserwowano przy szlifowaniu ściernicą stępią, której spoiwo wchodziło w kontakt z nierównościami powierzchni obrabianej, na ziarnach powstawały nalepy metalu, a praca tarcia stanowiła $95 \div 98\%$ energochłonności całkowitej [2] i [3]. Drgania ultradźwiękowe przedmiotu wywołane w części cyklu obróbki wyraźnie zmniejszały siłę styczną i siłę normalną w procesie szlifowania. To spowodowane było głównie poprawą warunków samooczyszczania się ziaren i usuwania z nalepiającego się materiału szlifowanego. Jednocześnie dynamika drgań ultradźwiękowych sprzyjała mikrowykruszeniom i poprawiała ostrość wierzchołków ziaren czynnych. Następuje wówczas wyraźna oznaka poprawy efektywności mikroobróbki, o czym świadczy wzrastający udział typowych wiórów w stosunku do produktów pochodzących z innych elementarnych procesów tribologicznych, takich jak odkształcanie plastyczne oraz odrywanie wypływek z obrzeży bruzd, tworzenie rys powierzchniowych i mikropęknięć sprzyjających lokalnym wykruszeniom materiału obrabianego [10].

Warunki badań eksperymentalnych

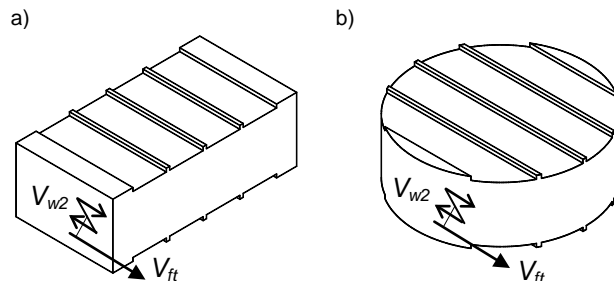
Stanowisko do badań bez i z celowo wprowadzanymi oscylacyjnymi drganiami zewnętrznymi przy wgłębnym obwodowym szlifowaniu prostoliniowo-zwrotnym płaszczyzn wyposażono w stolik oscylacyjny, którego konstrukcję zamieszczono na rysunku 1 [1]. Stolik ten jest przeznaczony do mocowania oraz do wprawiania przedmiotu obrabianego w dodatkowe drgania oscylacyjne v_{w2} w kierunku wzdłużnego posuwu stołu szlifierki v_{ft} . Na podstawie 1 (rys. 1) umieszczone są toczone prowadnice linowe 2, po których przesuwany jest uchwyt 3 mocujący przedmiot obrabiany 4. Ruch oscylacyjny przedmiotu z prędkością v_{w2} jest realizowany za pomocą wzbudnika elektrodynamicznego 5. Wzbudnik elektrodynamiczny 5 umożliwił uzyskanie drgań oscylacyjnych stolika o amplitudzie maksymalnej $50 \mu\text{m}$ i zakresie częstotliwości $20 \div 10000 \text{ Hz}$.



Rys. 1. Stolik wibracyjny [1]

Do badań procesu szlifowania przygotowano próbki z dwóch rodzajów materiałów: ze stali węglowej konstrukcyjnej wyższej jakości C45 i ze stali stopowej konstrukcyjnej do ulepszania cieplnego 42CrMo4 (40HM). Stal 42CrMo4 jest stalą trudno szlifowalną z uwagi na zawartość dodatków

stopowych. Próbki poddano obróbce cieplnej (nawęglanie i hartowanie w oleju). Uzyskano twardość $60 \div 63 \text{ HRC}$ dla stali 45 i ok. 60 HRC dla stali 42CrMo4. Do szlifowania zastosowano dwa rodzaje ściernic produkowanych przez koncern Saint-Gobain Abrasives w Kole. Pierwszą z nich była ściernica S1: typu 1-A-200x20x51-38A 60 G12 VBEP-33, a drugą stosowaną w badaniach była ściernica S2: typu 1-A-200x20x51-GF 46 J8 VX-33.



Rys. 2. Kształt próbek po próbach szlifowania: a) ze stali C45, b) ze stali 42CrMo4

Przed przystąpieniem do prób szlifowania szlifierka pracowała na biegu luzem przez około 30 minut, aby ustabilizować jej temperaturę pracy. Każdą próbę szlifowania wykonywano przeprowadzając następujące czynności:

- zamocowanie na stoliku wibracyjnym w uchwycie próbki przeznaczonej do szlifowania,
- przemieszczenie stołu poprzecznego szlifierki w położenie odpowiadające miejscu wykonania szlifów na powierzchni próbki (wykonywano po 4 szlifów o szerokości $b_s = 20 \text{ mm}$ na każdej z dwóch powierzchni roboczych próbki – w sumie na jednej próbce powstawało 8 szlifów jak pokazano na rysunku 2),
- wstępne szlifowanie próbki bez drgań w celu wypoziomowania powierzchni do prób, przy czym ostatnie przejście szlifujące prowadzono z dosuwem $a_n = 0,01 \text{ mm}$,
- pomiar głębokości (wartość odczytu) na początku i na końcu wykonanego wstępnie szlifów,
- ustawienie dosuwu nominalnego ściernicy a_n na głębokość założoną w danej próbce w przypadku próby szlifowania tradycyjnego i wibracyjnego bez wyiskrzania,
- odblokowanie stolika wibracyjnego w przypadku próby szlifowania wibracyjnego bez i z wyiskrzaniem oraz włączenie drgań oscylacyjnych na przedmiot obrabiany o założonej częstotliwości i amplitudzie,
- uruchomienie posuwu wzdłużnego stołu szlifierki z założoną prędkością v_{ft} ,
- wyłączenie posuwu wzdłużnego stołu szlifierki po jednym posuwie szlifującym lub po czasie wyiskrzania odpowiadającym liczbie przejść wyiskrzających,
- pomiar głębokości (wartość odczytu) na początku i na końcu powierzchni szlifów po przeprowadzonej próbce.
- określenie wartości rzeczywistej głębokości a_e (różnica wartości odczytu) na początku i na końcu powierzchni szlifów.

Jako ciecz chłodząco – smarującą CCS zastosowano $3 \div 5\%$ emulsję wodną na bazie oleju emulgującego do obróbki metali typu Emulgoł ES-12 (producent Petro-Oil).

W celu zapewnienia powtarzalności warunków szlifowania w odniesieniu do ściernicy tj. jej ostrości, przeciwdziałaniu jej zalepianiu się i zlikwidowaniu falistości powstającej na jej powierzchni, przed założeniem nowej próbki na stolik wibracyjny, ściernicę obciążano jednoziarnistym obciążaczem diamentowym wg następujących warunków: posuw obciążania $f_d = 0,03 \div 0,1 \text{ mm/obr}$ ($v_d = 0,12 \div 0,24 \text{ m/min}$) - większa wartość dla ściernicy z grubszym ziarnem ściernym

(GF 46 J8 VX). Proces obciążania prowadzono w następujący sposób: 3 przejścia po $a_d = 0,03\text{mm}$, 3 przejścia po $a_d = 0,02\text{mm}$ i 3 przejścia po $a_d = 0,01\text{mm}$ oraz 1 przejście bez wprowadzania dosuwu.

Wyniki badań doświadczalnych

W badaniach doświadczalnych, pomiar rzeczywistej głębokości szlifowanej a_e określano jako różnicę wskazań czujnika przed i po próbie szlifowania. Do pomiaru głębokości użyto cyfrowego czujnika mikronowego firmy Hommel zamocowanego w specjalnej stopce. Pomiaru prowadzono na obu końcach szlifowanej powierzchni próbki. Pomiaru te wykonywano zarówno przy szlifowaniu wstępnym (zgrubnym) z dosuwem: $a_n = 0,03$; $0,02$ mm/przejście jak i przy szlifowaniu wykańczającym (dokładnym) z dosuwem: $a_n = 0,01$; $0,005$ mm/przejście oraz przy szlifowaniu gładkościowym (wyiskrzaniu). Uzyskane wyniki pomiarów rzeczywistej głębokości szlifowanej a_e poddano opracowaniu statystycznemu.

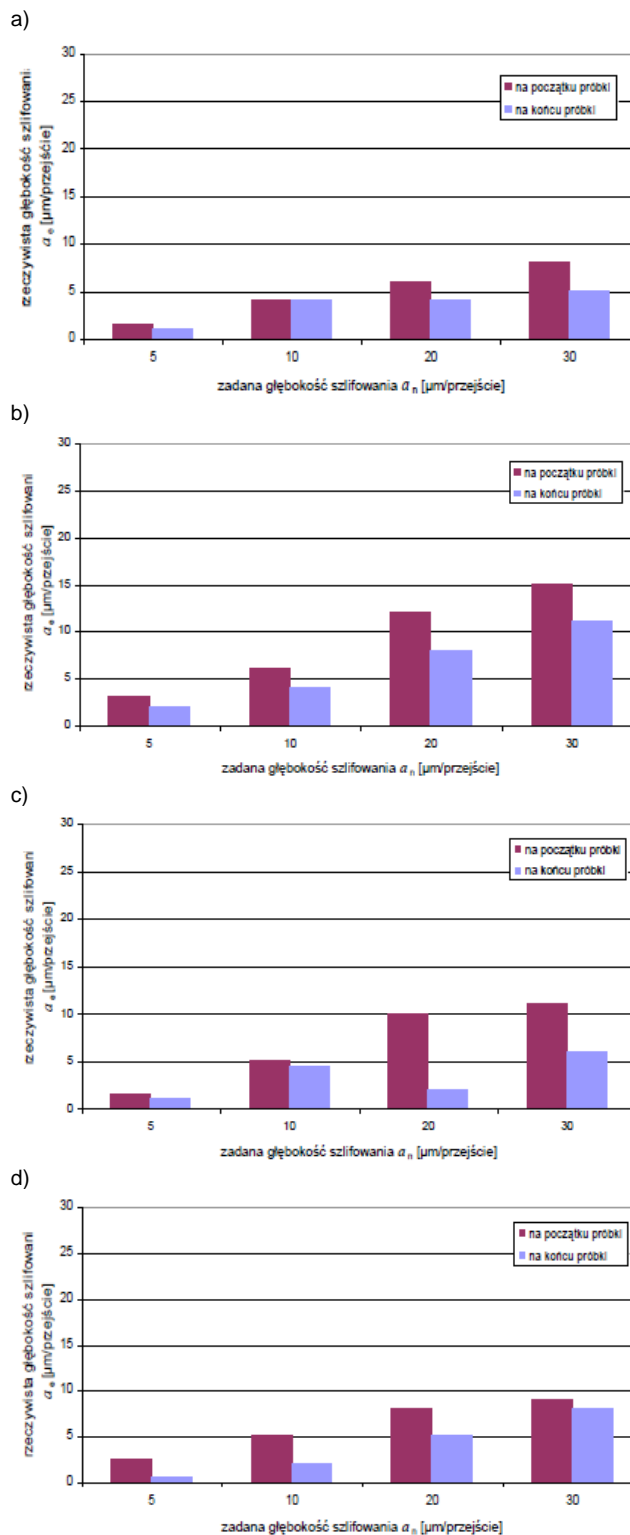
Dla tych trzech faz cyklu szlifowania przeprowadzono próby szlifowania tradycyjnego i wibracyjnego z wybranymi wcześniej prędkościami posuwu stycznego [1]. Dla częstotliwości 86 Hz uzyskiwano maksymalną amplitudę drgań stolika wibracyjnego rzędu $50\ \mu\text{m}$. Dla częstotliwości 300 Hz uzyskiwano minimalną amplitudę drgań rzędu $2\ \mu\text{m}$. Częstotliwość 150 Hz wytypowano na podstawie badań teoretycznych oraz pomiarów doświadczalnych. Dla tej częstotliwości uzyskiwano drgania próbki rzędu $10\ \mu\text{m}$.

Na rysunku 3 zaprezentowano zależność rzeczywistej głębokości szlifowania a_e w funkcji zadanej głębokości a_n przy szlifowaniu wgłębnym próbek ze stali C45 z użyciem ściernicy typu S1 i z prędkością posuwu wzdłużnego $v_{ft} = 10$ m/min. Wartości rzeczywistej głębokości szlifowania zmierzonej na początku i końcu próbki przedstawiono w formie wykresów słupkowych odpowiednio dla szlifowania wgłębnego bez drgań wprowadzanych (rys. 3a) oraz dla szlifowania wgłębnego z drganiami wprowadzonymi o częstotliwościach wcześniej wytypowanych do badań: 86 Hz (rys. 3b), 150 Hz (rys. 3c) i 300 Hz (rys. 3d). Natomiast na rysunku 4 zamieszczono wykres linii trendu średniej rzeczywistej głębokości szlifowania $a_{e\bar{s}}$ w funkcji zadanej głębokości a_n dla wyżej opisanych charakterystyk.

Z analizy przedstawionych charakterystyk wynikają oczywiste zależności. Wartość rzeczywista głębokości szlifowania a_e przypadająca w μm na jedno przejście jest mniejsza w stosunku do zadanej głębokości szlifowania a_n . Im większa głębokość nominalna tym większa głębokość rzeczywista. Głębokość rzeczywista zmierzona na początku próbki (w miejscu gdzie próbka wchodzi w styk ze ściernicą) jest większa niż na jej końcu. Wynika to stąd, że w późniejszej fazie szlifowania ściernica podnosi się. Rzeczywista głębokość a_e w μm na jedno przejście szlifowania bez drgań jest mniejsza niż przy szlifowaniu z drganiami. Największe wartości rzeczywistej głębokości szlifowania a_e w μm na jedno przejście w stosunku do zadanej głębokości szlifowania a_n uzyskano przy szlifowaniu wibracyjnym z drganiami o częstotliwości 86 Hz (rys. 3b).

Następnie, przeprowadzono pomiary rzeczywistej głębokości szlifowania a_e w funkcji liczby przejść wyiskrzających bez i z drganiami wprowadzonymi o wybranej przykładowo częstotliwości 150 Hz dla próbek ze stali C45 z użyciem ściernicy typu S1 oraz typu S2 i z prędkością posuwu wzdłużnego $v_{ft} = 10$ m/min. Wyniki badań zestawiono w formie wykresów słupkowych odpowiednio na rysunkach 5 i 6. Również tutaj stwierdzono, że rzeczywista głębokość a_e

bez drgań jest mniejsza niż przy szlifowaniu z drganiami o częstotliwości 150 Hz.

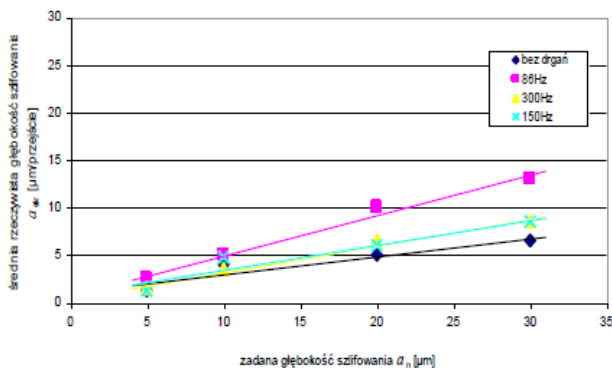


Rys. 3. Rzeczywista głębokość szlifowania a_e w funkcji zadanej głębokości a_n przy szlifowaniu wgłębnym próbek ze stali C45 z użyciem ściernicy typu S1 i z prędkością posuwu wzdłużnego $v_{ft} = 10$ m/min: a) bez drgań wprowadzanych, b) z drganiami wprowadzonymi o częstotliwości 86 Hz, c) z drganiami wprowadzonymi o częstotliwości 150 Hz i d) z drganiami wprowadzonymi o częstotliwości 300 Hz

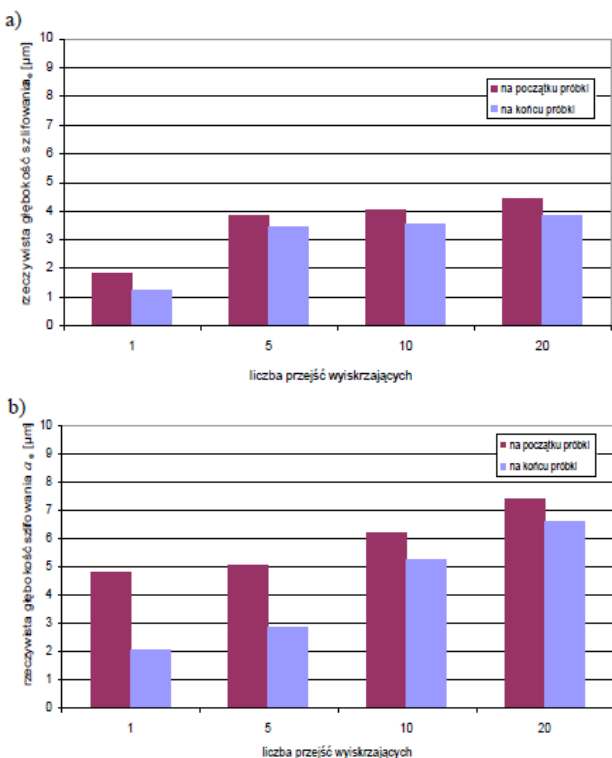
W kolejnych badaniach mierzono rzeczywistą głębokość szlifowania a_e w funkcji liczby przejść wyiskrzających bez i z drganiami wprowadzonymi dla drugiego rodzaju próbek ze stali 42CrMo4 (40HM) z użyciem ściernicy typu S1 i z prędkością posuwu wzdłużnego $v_{ft} = 10$ m/min oraz

z prędkością posuwu wzdłużnego $v_{ft} = 15$ m/min. Wykresy linii trendu średniej rzeczywistej głębokości szlifowania a_e w funkcji liczby przejść wyiskrzających dla tych charakterystyk zestawiono odpowiednio na ilustracjach 7 i 8.

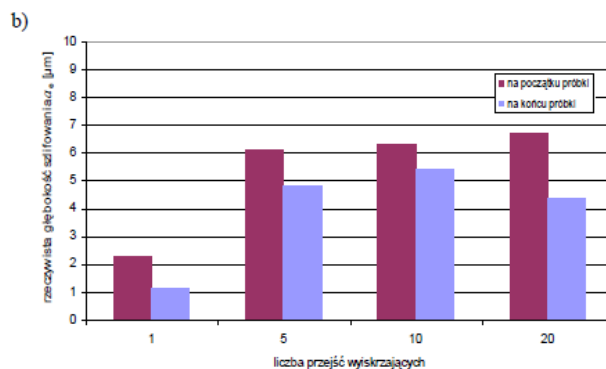
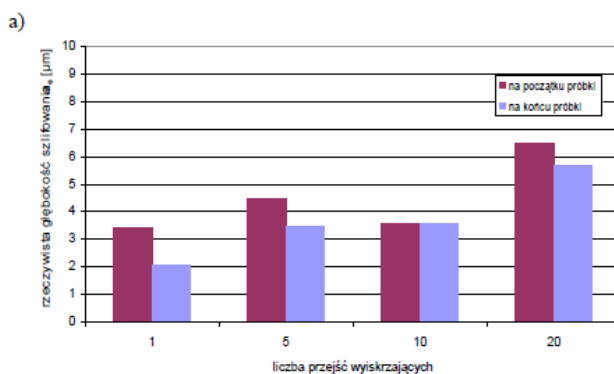
Analizując przedstawione wykresy (rysunki 7 i 8) można zauważyć, że im więcej przejść wyiskrzających tym większa wartość rzeczywistej głębokości szlifowania (wyiskrzania) a_e . Nieco większe wartości rzeczywistej średniej głębokości szlifowania a_{eSR} uzyskiwano w czasie prób szlifowania z mniejszą prędkością posuwu wzdłużnego tj. $v_{ft} = 10$ m/min, niż z prędkością posuwu wzdłużnego $v_{ft} = 15$ m/min.



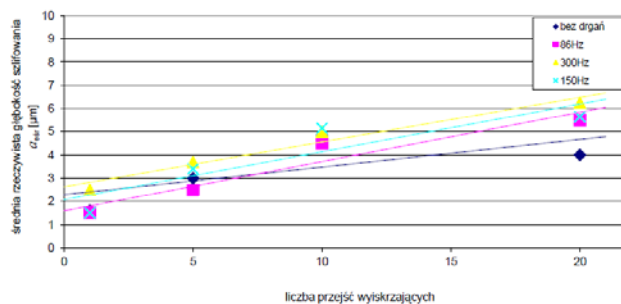
Rys. 4. Wykres linii trendu średniej rzeczywistej głębokości szlifowania a_{eSR} w funkcji zadanej głębokości a_n przy szlifowaniu wgłębnym bez i z drganiami wprowadzanymi próbek ze stali C45 z użyciem ściernicy typu S1 i z prędkością posuwu wzdłużnego $v_{ft} = 10$ m/min



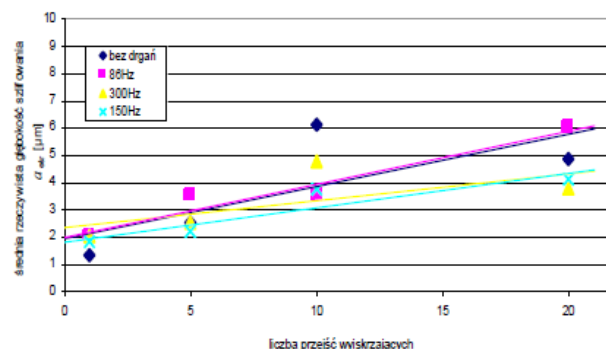
Rys. 5. Rzeczywista głębokość szlifowania a_e w funkcji liczby przejść wyiskrzających próbek ze stali C45 z użyciem ściernicy typu S1 i z prędkością posuwu wzdłużnego $v_{ft} = 10$ m/min: a) bez drgań wprowadzanych, b) z drganiami wprowadzanymi o częstotliwości 150 Hz



Rys. 6. Rzeczywista głębokość szlifowania a_e w funkcji liczby przejść wyiskrzających próbek ze stali C45 z użyciem ściernicy typu S2 i z prędkością posuwu wzdłużnego $v_{ft} = 10$ m/min: a) bez drgań wprowadzanych, b) z drganiami wprowadzanymi o częstotliwości 150 Hz



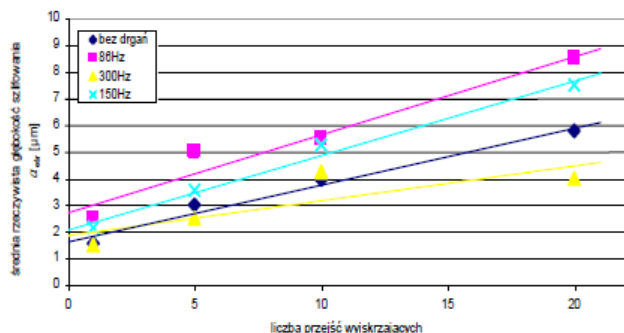
Rys. 7. Wykres linii trendu średniej rzeczywistej głębokości szlifowania a_{eSR} w funkcji liczby przejść wyiskrzających bez i z drganiami wprowadzanymi próbek ze stali 42CrMo4 z użyciem ściernicy typu S1 i z prędkością posuwu wzdłużnego $v_{ft} = 10$ m/min



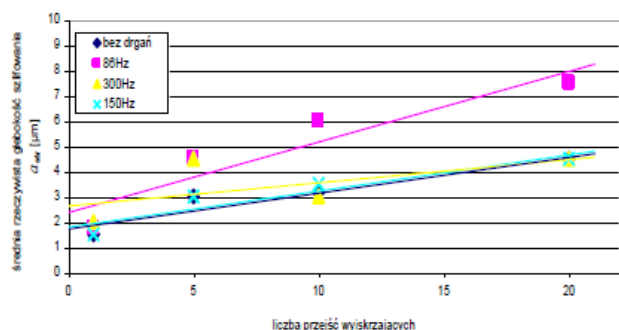
Rys. 8. Wykres linii trendu średniej rzeczywistej głębokości szlifowania a_{eSR} w funkcji liczby przejść wyiskrzających bez i z drganiami wprowadzanymi próbek ze stali 42CrMo4 z użyciem ściernicy typu S1 i z prędkością posuwu wzdłużnego $v_{ft} = 15$ m/min

Opracowano także, dla drugiego typu ściernicy S2, wyniki pomiarów rzeczywistej głębokości szlifowania a_e w funkcji liczby przejść wyiskrzających bez i z drganiami wprowadzanymi próbek ze stali 42CrMo4 z prędkością posuwu wzdłużnego $v_{ft} = 10$ m/min i z prędkością posuwu wzdłużnego

$v_{ft} = 15$ m/min. Wykresy linii trendu średniej rzeczywistej głębokości szlifowania a_{eSR} w funkcji liczby przejść wyiskrzających dla tych parametrów zestawiono odpowiednio na rysunkach 9 i 10.



Rys. 9. Wykres linii trendu średniej rzeczywistej głębokości szlifowania a_{eSR} w funkcji liczby przejść wyiskrzających bez i z drganiami wprowadzanymi próbek ze stali 42CrMo4 z użyciem ściernicy typu S2 i z prędkością posuwu wzdłużnego $v_{ft} = 10$ m/min



Rys. 10. Wykres linii trendu średniej rzeczywistej głębokości szlifowania a_{eSR} w funkcji liczby przejść wyiskrzających bez i z drganiami wprowadzanymi próbek ze stali 42CrMo4 z użyciem ściernicy typu S2 i z prędkością posuwu wzdłużnego $v_{ft} = 15$ m/min

Rzeczywista głębokość szlifowania a_e bez drgań jest niższa niż przy szlifowaniu z drganiami o częstotliwości 86 Hz i z drganiami o częstotliwości 150 Hz. Najwyższe wartości rzeczywistej głębokości szlifowania a_e uzyskano przy szlifowaniu wibracyjnym z drganiami o częstotliwości 86 Hz. Im więcej przejść wyiskrzających tym większa wartość rzeczywistej głębokości szlifowania (wyiskrzania) a_e . Szlifowanie wibracyjne próbek ze stali 42CrMo4 przy użyciu ściernicy typu S2 powoduje wzrost średniej rzeczywistej głębokości szlifowania a_{eSR} w funkcji liczby przejść wyiskrzających w (rysunki 9 i 10) stosunku do prób szlifowania przy użyciu ściernicy typu S1 (rysunki 7 i 8). Przy czym ten wzrost jest większy w przypadku szlifowania z prędkością posuwu wzdłużnego $v_{ft} = 10$ m/min (rys. 9), niż z prędkością posuwu wzdłużnego $v_{ft} = 15$ m/min (rys. 10).

Wnioski

Wartość rzeczywista głębokości szlifowania a_e przypadająca w mikrometrach na jedno przejście jest mniejsza w stosunku do zadanej głębokości szlifowania a_n .

Im większa jest nastawiona głębokość nominalna a_n tym większa jest uzyskiwana głębokość rzeczywista a_e .

Głębokość rzeczywista zmierzona na początku próbki (w miejscu, gdzie próbka wchodzi w styk ze ściernicą) jest większa niż na jej końcu. Wynika to stąd, że w późniejszej fazie szlifowania ściernica podnosi się. Im mniejsza jest prędkość posuwu wzdłużnego tym większa jest rzeczywista głębokość szlifowania.

Rzeczywista głębokość a_e w mikrometrach na jedno przejście szlifowania z drganiami jest większa niż przy szlifowaniu bez drgań. Najwyższe wartości rzeczywistej głębokości szlifowania a_e w mikrometrach na jedno przejście w stosunku do zadanej głębokości szlifowania a_n uzyskano przy szlifowaniu wibracyjnym z drganiami o częstotliwości 86 Hz (wzrost o 80% dla $a_n = 30\mu\text{m}$).

Dla większej liczby przejść wyiskrzających uzyskiwano większą głębokość rzeczywistą szlifowania.

Dla tego samego materiału próbki ze stali 42CrMo4, w przypadku prowadzenia szlifowania wyiskrzającego z prędkością posuwu wzdłużnego $v_{ft} = 10$ m/min, uzyskiwano wyższe wartości rzeczywistej głębokości szlifowania a_e stosując ściernicę S2, niż przy użyciu ściernicy S1. Można to wytłumaczyć tym, że wprowadzając drgania z zewnątrz do procesu szlifowania wywoływane jest zjawisko zmiany tarcia przy skrawaniu. Struktura ściernicy typu S2 sprzyja jej samoostrzeniu (mikropęknięcia ziaren ściernych i ich wykruszanie) w wyniku drgań wprowadzanych.

LITERATURA

1. Bechciński G.: Aktywne oddziaływanie poprzez drgania na zmniejszenie falistości szlifowanych powierzchni płaskich. Praca Doktorska, Politechnika Łódzka, 2006.
2. Dąbrowski L., Marciniak M., Nowicki B., Pracki M.: Niekonwencjonalne procesy obróbki ściernic. XXV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernic, Wrocław-Duszniki Zdrój 2002, s. 33-54.
3. Dąbrowski L., Marciniak M., Stefko A., Perończyk J.: Badanie wpływu drgań ultradźwiękowych na rezultaty szlifowania. XXVIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernic, Warszawa – Mszczonów 2005, s. 226-231.
4. Nakagawa T., Suzuki K., Uematsu T.: Highly Efficient Grinding of Ceramic and Hard Metals on Grinding Center. Annals of the CIRP, vol. 35/1/1986, pp. 205-210.
5. Nowicki B.: Struktura geometryczna. Chropowatość i falistość powierzchni. WNT, Warszawa 1991.
6. Przybylski W.: Szlifowanie ściernicami rowkowanymi. XIX Naukowa Szkoła Obróbki Ściernic, Łódź – Bełchatów 1996, s. 103-108.
7. Qu W., Wang K., Miller M., Huang Y., Chandra A.: Using vibration - assisted grinding to reduce subsurface damage. Precision Engineering, 24/4/2000, pp. 329-337.
8. Spur G., Holl S.-E.: Material Removal Mechanisms during Ultrasonic Assisted Grinding. Production Engineering, vol. 4/2/1997, pp. 9-14.
9. Uematsu T., Suzuki K., Yanase T., Nakagawa T.: A new complex grinding method for ceramic materials combined with Ultrasonic vibration and EDM. Proc. Of Int. Symposium on Ceramic Components for engines, University of Tokyo, Japan, 1990.
10. Uhlmann E., Ardelt T.: Influence of Kinematics on the Face Grinding Process on Lapping Machines. Annals of the CIRP, vol. 48/1/1999, pp. 281-284.