

Sposoby modelowania dynamiki szlifierek z uwzględnieniem drgań karbujących

WITOLD PAWŁOWSKI
FRANCISZEK ORYŃSKI*

Przedstawiono problem modelowania procesu szlifowania z uwzględnieniem samowzbudnych drgań karbujących. Opisano metody jego modelowania oraz przegląd światowych dokonań w tym zakresie. Analizę przeprowadzono w celu określenia efektywnego sposobu opracowania modelu procesu szlifowania wibracyjnego zaproponowanego przez autorów artykułu.

Jednym z niezmiernie istotnych problemów występujących podczas obróbki ściernic są drgania samowzbudne, znane jako regeneracyjne drgania karbujące (*chatter*). Są one źródłem obniżenia geometrycznej dokładności powierzchni przedmiotu obrabianego i powstawania zaburzeń jego kształtu w postaci karbów. Istotą powstawania tych drgań jest niestabilność dynamiczna układu OPNPs (Obrabiarka-Przedmiot-Narzędzie-Proces skrawania) występująca w pewnym zakresie parametrów kinematycznych szlifowania. Efektem niestabilności dynamicznej są narastające drgania narzędzia względem przedmiotu obrabianego, powodujące powstawanie zaburzeń kształtu zarówno ściernicy, jak i szlifowanego przedmiotu (regeneracja drgań karbujących na ściernicy i/lub na przedmiocie obrabianym). Pogłębianie się tych zaburzeń kształtu w warunkach utraty stabilności układu OPNPs odbywa się wraz z każdym obrotem narzędzia przy regeneracji drgań karbujących na ściernicy. Natomiast, w przypadku regeneracji drgań na przedmiocie, karby pogłębiają się z każdorazowym przejściem ściernicy przez przedmiot obrabiany (tzn. po kolejnym obrocie przedmiotu podczas szlifowania wałków lub przejściu obróbkowym przy szlifowaniu płaszczyzn). Przeciwdziałanie temu zjawisku może zawierać działania mające na celu uniknięcie wystąpienia niestabilności dynamicznej układu OPNPs dzięki odpowiedniemu doborowi parametrów kinematycznych procesu szlifowania. Ta metoda prowadzi jednakże do konieczności wyboru nieefektywnych – z punktu widzenia wydajności obróbki – parametrów skrawania. Kolejną metodą może być zmiana parametrów układu dynamicznego szlifiarki, np. obniżenie sztywności napędu przedmiotu lub zwiększenie sztywności podparcia ściernicy oraz przedmiotu obrabianego po to, aby znaleźć się w strefie dynamicznej stabilności układu. Alternatywną drogą – proponowaną przez autorów artykułu – jest zakłócenie procesu regeneracji drgań poprzez aktywne oddziaływanie na charakter przebiegu czasowego wypadkowej prędkości szlifowania, przerywające ciągłość procesu narastania zaburzeń kształtu. To powoduje, że zaburzenia kształtu w jednym przejściu nie znikają, ale w procesie złożonym z wielu przejść nie kumulują swych wartości i rozkładają się równomiernie na całej powierzchni przedmiotu obrabianego. W efekcie obróbka przebiega w strefie efektywnych wydajnościowo parametrów powodujących niestabilność procesu, lecz zaburzenia kształtu powstające na przedmiocie obrabianym pozostają na niskim poziomie. Tego rodzaju podejście wymaga znalezienia sposobów teoretycznego rozwiązania problemu przeciwdziałania

przyczynom powstawania drgań samowzbudnych podczas szlifowania. Mogą one opierać się na poprawnie zidentyfikowanych, zbudowanych i zweryfikowanych pod względem przyjętych wymagań modelach dynamicznych, uwzględniających zarówno specyfikę szlifiarki, jak i dokonywanego na niej procesu obróbki.

Stworzenie poprawnego modelu maszyny i procesu szlifowania jest problemem złożonym. Należy odpowiedzieć bowiem na pytanie i podjąć decyzję, czy zastosowanie modelu ujętego w postaci np. układu równań różniczkowych zwyczajnych zapewni możliwość właściwego wykorzystania tego modelu do celów symulacji przy przewidzianych do analizy zachowaniach dynamicznych. Należy uwzględnić wiele specyficznych zachowań badanego obiektu, jak np. luzy w węzłach kinematycznych czy charakter uwarunkowań wprowadzanych przez proces szlifowania. Takie zachowania mają często charakter silnie nieliniowy, co powoduje, że do poprawnego matematycznego rozwiązania tego zagadnienia można w efektywny sposób stosować jedynie metody cyfrowe. Dużych możliwości dotyczących szybkiego zbudowania i symulacyjnego przetestowania badanego obiektu dostarcza środowisko Matlab-Simulink. Program jest wyposażony w szereg predefiniowanych cyfrowych metod rozwiązywania układów równań różniczkowych z możliwością sterowania przez użytkownika wielkością kroku całkowania. Model, po napisaniu układu równań różniczkowych, buduje się na zasadzie wybierania narzędzi łączonych w działający schemat blokowy. Podczas trwania symulacji istnieje możliwość przeprowadzenia ciągłego podglądu wartości symulowanych w funkcji czasu przebiegu symulacji lub w funkcji innej analizowanej wartości.

Inne podejście do zagadnienia analizy dynamiki maszyn stanowi wykorzystywanie przestrzennego modelowania z zastosowaniem nowoczesnych systemów CAD. Dzięki wykorzystaniu specjalizowanych modułów przeznaczonych do analizy dynamiki brył dysponuje się narzędziami do definiowania wzajemnych relacji pomiędzy oddziałującymi na siebie elementami, jak np. kreator definiowania dynamicznych oddziaływań pomiędzy współpracującymi częściami, definiowanie wymuszenia kinematycznego, siłowego czy grawitacji itp. Przy zapisie charakteru wymuszenia można stosować diagramy opisujące czasowy przebieg wymuszenia. Wyniki symulacji otrzymuje się w postaci diagramów zależności badanego parametru od czasu lub w formie serii liczbowych danych, wyeksportowanych w postaci tabelarycznej do pliku tekstowego, w celu dalszego ich opracowania. Tego typu modelowanie i analiza zapewniają możliwość ujęcia masowej wzajemnej interakcji elementów z uwzględnieniem cech bryłowych, takich jak rozmiar, kształt, masa, moment bezwładności itp. Dołączając do tego możliwości analizy odkształceń i naprężeń za pomocą metody elementów skończonych, otrzymuje się pełny, analityczny pakiet, pozwalający na symulację zarówno zachowań kinematycznych rozważanych brył, jak też ich oddziaływań siłowych. Zaletą prowadzenia tej analizy w środowisku CAD jest możliwość bardzo szczegółowego zamodelowania geometrii badanych obiektów i ich wzajemnych relacji geometrycznych. Z matematycznego punktu wi-

* Prof. dr hab. inż. Franciszek Oryński i dr inż. Witold Pawłowski – Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej.

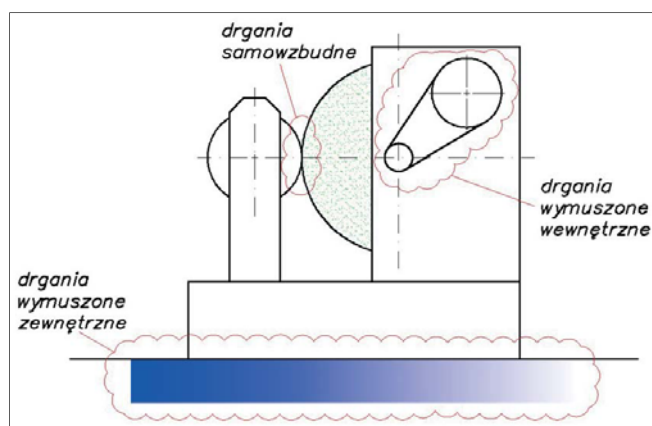
denia odpowiada to zdefiniowaniu i rozwiązaniu układu równań różniczkowych cząstkowych dla rozważanych brył.

Kolejne podejście do zagadnienia modelowania dynamiki szlifierki i procesu szlifowania to tzw. modelowanie hybrydowe. Zakłada ono jak najwierniejsze odwzorowanie modelowe tych elementów badanego układu, które mogą być w dokładny sposób wprowadzone do modelu za pomocą znanych metod opisu matematycznego. Natomiast wszystkie elementy o niezbyt dobrze znanym charakterze są modelowane na zasadzie „czarnej skrzynki”. Charakter zachowań „czarnej skrzynki” może zostać określony doświadczalnie, np. za pomocą analizy modalnej. Wówczas oddziaływania elementów zgrupowanych w tzw. czarnej skrzynce zastępowane są w dziedzinie częstotliwości za pomocą widmowej funkcji przejścia, której postać jest uzyskiwana poprzez doświadczenie modalne. Ten sposób przedstawienia modelu łączy precyzję modelowania strukturalnego i wiarygodność płynącą z faktu uzyskiwania wyników z doświadczenia. Wiadomo, że zarówno postać modelu, jak i forma oraz przebieg doświadczenia modalnego powinny być dogłębnie przemyślane i dobrane do założonego celu symulacji. Z kolei jest istotne, aby model zawierał te elementy, które mają decydujący wpływ na zachowanie analizowanej wielkości fizycznej. Takie podejście do zagadnienia modelowania złożonych układów dynamicznych zaczyna zdobywać coraz większą popularność wśród badaczy. Prawdopodobnie wynika to z przeświadczenia o wroście możliwości i dostępności sprzętu pomiarowego służącego do prowadzenia doświadczalnej analizy modalnej.

Przedmiot badań

Przyczynom i skutkom drgań w procesie szlifowania poświęciło już wnikliwą uwagę wielu badaczy. Zwykle drgania są traktowane jako czynnik pogarszający efekt końcowy procesu szlifowania wyrażany geometrią powierzchni szlifowanej. Dlatego celem prowadzonych badań jest możliwie najgłębsze rozpoznanie przyczyn różnych rodzajów drgań w szlifierkach, a następnie poszukiwanie dróg eliminowania tych przyczyn lub przeciwdziałania negatywnym skutkom drgań.

Istnieją dwa podstawowe rodzaje drgań występujące w procesach szlifowania: drgania wymuszone (wewnętrzne i zewnętrzne) oraz drgania samowzbudne [1, 7, 9, 11] (rys. 1). Niewyrównoważenie i mimośrodowość ściernicy są głównymi przyczynami powstawania drgań wymuszonych wewnętrznych [15]. Głównym problemem w odniesieniu do tego typu drgań jest wyeliminowanie ich źródeł, gdyż te mogą być stosunkowo łatwo zlokalizowa-



Rys. 1. Rodzaje drgań przy szlifowaniu

ne poprzez pomiar i analizę częstotliwości. Istnieją inne, znane źródła drgań, takie jak drgania wywołane przez urządzenia hydrauliczne występujące w obrabiarce oraz drgania podłoża, które często są trudne do zlokalizowania i skutecznego wyeliminowania. Stanowią one źródła drgań wymuszonych zewnętrznych.

Wiele ośrodków naukowych starało się zrozumieć i wyjaśnić mechanizm powstawania i regeneracji drgań samowzbudnych w procesie szlifowania. Wśród różnych znanych przyczyn niestabilności procesu, będących źródłem drgań samowzbudnych, np. żyroskopowego wzbudzenia drgań ściernic [12, 14], falistość czynnej powierzchni ściernicy oraz falistość przedmiotu obrabianego stanowią najważniejsze czynniki powodujące podczas szlifowania regenerację drgań [15], obserwowaną również w innych procesach skrawania [22]. Z powodu obrotowego ruchu przedmiotu, podczas obróbki skrawaniem, fale powstałe na powierzchni przedmiotu (wałka), wywołane przez względne drgania między przedmiotem i ściernicą, skutkują zmianą głębokości skrawania po jednym obrocie przedmiotu. Przesunięcie fazowe pomiędzy powstałą falistością powierzchni i aktualnymi względnymi drganiami skutkuje niestabilnością procesu. Charakterystyczną cechą regeneracji drgań karbujących jest jednak fakt, że zjawisko to może dotyczyć zarówno powierzchni przedmiotu, jak i ściernicy [7]. Wpływa to na znaczną komplikację analizy przyczyn i skutków regeneracji drgań samowzbudnych. W wyniku zjawiska regeneracji drgań fale powstałe na powierzchni przedmiotu wzrastają stosunkowo szybko. Ten typ drgań regeneracyjnych jest postrzegany jako jedno z najważniejszych ograniczeń przy doborze parametrów kinematycznych obróbki [7]. Z drugiej zaś strony fale wygenerowane na powierzchni ściernicy rosną wolniej z powodu większej wytrzymałości ściernicy na zużycie. Dlatego ten rodzaj karbowania jest jednym z kryteriów żywotności ściernicy [7]. Gdy wzrastająca amplituda falistości osiągnie określoną graniczną wartość, uważa się, że ściernica uległa zużyciu i powinna zostać obciążona. Jednak w niesprzyjających warunkach zjawisko regeneracji drgań może również wystąpić podczas procesu obciążania, powodując powstanie falistości na powierzchni świeżo ukształtowanej ściernicy.

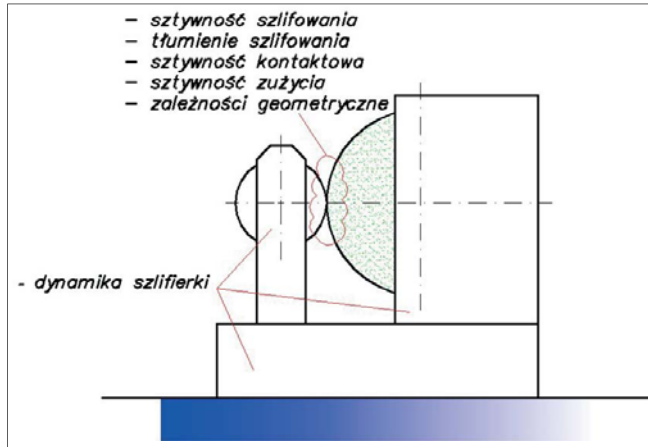
Właściwy dobór parametrów szlifowania w odniesieniu do stosowanych, typowych ściernic może doprowadzić do ograniczenia szybkości wzrostu amplitudy karbów. Częstotliwość karbowania, która jest ściśle związana z częstotliwością drgań własnych układu mechanicznego, a także prędkość przedmiotu szlifowanego mają decydujący wpływ na występowanie dwóch różnych typów drgań regeneracyjnych [7].

Proces regeneracji drgań jest odmienny dla procesów szlifowania wałków, otworów czy płaszczyzn [6]. W przypadku szlifowania otworów i płaszczyzn częstotliwość karbowania jest przeważnie związana z częstotliwością drgań własnych zespołu wrzecionowego ściernicy, ponieważ sztywność dynamiczna tych elementów jest mniejsza niż zespołu mocowania przedmiotu. W przypadku szlifowania wałków, sztywność dynamiczna zespołu mocowania przedmiotu jest mniejsza niż zespołu wrzecionowego ściernicy. Ponadto podczas szlifowania płaszczyzn karby wywołane zjawiskiem regeneracji drgań na powierzchni przedmiotu nie zawsze są obserwowane. Jest to spowodowane tym, że przesunięcie fazowe pomiędzy falistością powierzchni i aktualnymi drganiami względnymi nie jest każdorazowo stałe, z powodu błędów powtarzalności napędu posuwowego przedmiotu. Z tego względu wnioski formułowane, np. przy badaniach szlifowania płaszczyzn,

nie mogą być uogólniane na wszystkie rodzaje szlifowania, gdyż każdy z nich powinien być rozpatrywany indywidualnie.

Przegląd sposobów modelowania dynamiki procesu szlifowania

Matematyczny model dynamiki procesów szlifowania powinien uwzględniać czynniki [7] wymienione na rys. 2.



Rys. 2. Czynniki wpływające na proces szlifowania

Zbudowanie pełnego schematu blokowego przedstawiającego dynamikę procesu szlifowania jest skomplikowane. Wielu badaczy dzieli proces obróbki na dwa odrębne przypadki: jeden model dynamiki procesu szlifowania dotyczy karbowania powierzchni przedmiotu, a drugi – karbowania ściernicy. Schematy blokowe modeli dynamiki poszczególnych przypadków procesu szlifowania zostały zaprezentowane na rys. 3 i 4, odpowiednio dla regeneracji śladu na przedmiocie i na ściernicy [7].

Podejście do analizy procesu szlifowania i regeneracji drgań przez autorów publikacji [8] ma już nieco inny charakter. Zastosowano tu rozwiązanie kompleksowe w stosunku do obu typów regeneracji drgań i ujęto je w jednym modelu dynamiki procesu szlifowania. Przeprowadzono również badania doświadczalne weryfikujące przedstawiony model.

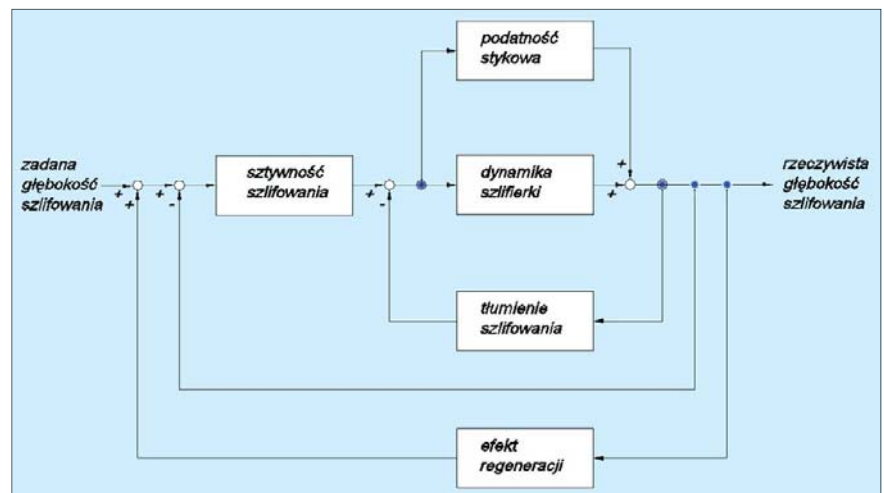
Zagadnieniem wpływu sztywności napędu oraz drgań skrętnych przedmiotu na falistość powierzchni obrabianej przy szlifowaniu wałków zajmowano się bardzo wnikliwie [2, 3, 12, 13]. Badania naukowców wykazały jednoznaczną zależność, definiowaną następująco: wraz ze spadkiem sztywności napędu przedmiotu obrabianego wzrasta jakość powierzchni obrabianej wyrażana obniżeniem falistości. Podobna analiza może być prowadzona w odniesieniu do szlifowania otworów i powierzchni płaskich [6].

Na podstawie wyników badań można sformułować dla prezentowanych przypadków następujące wnioski:

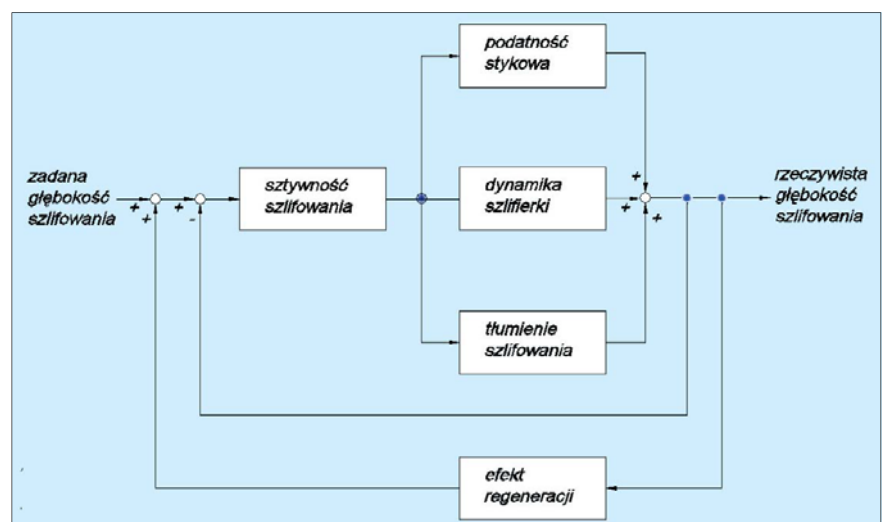
- karbowanie powstaje szybciej w warunkach większego dosuwu ściernicy, większej szerokości szlifowania, mniejszej prędkości przedmiotu i wyższej prędkości ściernicy,
- szybkość narastania amplitudy drgań maleje wraz ze zmniejszeniem sztywności stykowej oraz wraz ze wzrostem sztywności zużycia ściernicy.

Rozróżnia się dwa rodzaje operacji szlifowania wałków: wgłębne i wzdłużne. Analiza stabilności jest znacznie bardziej złożona przy szlifowaniu wzdłużnym niż przy szlifowaniu wgłębnym wałków, ponieważ trzeba uwzględnić różne warunki styku pomiędzy ściernicą i przedmiotem wzdłuż szerokości ściernicy. Na podstawie badań teoretycznych i eksperymentalnych, dotyczących drgań karbowanych na przedmiocie podczas szlifowania wałków, zostały sformułowane wnioski [5], przy czym do najważniejszych z nich należy zaliczyć stwierdzenia, że:

- proces dąży do niestabilności w warunkach mniejszej prędkości wzdłużnej, większej prędkości obrotowej przedmiotu, większej szerokości ściernicy i mniejszej głębokości (dosuwu) szlifowania,
- częstotliwość karbowania wzrasta wraz ze wzrostem prędkości wzdłużnej, szerokości ściernicy oraz głębokości szlifowania i prędkości obrotowej przedmiotu.



Rys. 3. Model dynamiki procesu szlifowania z uwzględnieniem regeneracji drgań na przedmiocie



Rys. 4. Model dynamiki procesu szlifowania z uwzględnieniem regeneracji drgań na ściernicy



Za najważniejszy cel w badaniach zjawiska karbowania powierzchni należy uznać opracowanie praktycznych sposobów eliminowania tego zjawiska lub minimalizowania jego skutków [10]. Bazując na rozpoznaniu zasady karbowania, zostały zaproponowane pewne skuteczne metody likwidowania lub znaczącego ograniczenia jego wpływu na przebieg i wyniki procesu szlifowania, ujęte w postaci następujących strategii:

- modyfikacja warunków szlifowania,
- zmiana dynamicznej sztywności układu mechanicznego,
- zakłócanie zjawiska regeneracji drgań.

Z teoretycznego punktu widzenia można stwierdzić, że mechanizmy samowzbudnych drgań karbujących występujących w szlifowaniu zostały już dość wszechstronnie zbadane. Jednakże zjawisko karbowania w szlifowaniu dostarcza stale jeszcze wielu znaków zapytania. Wynika to głównie z trudności w wyprzedzającym identyfikowaniu dynamicznych parametrów, charakterystyk stanu szlifierki i ściernicy, np. w modelach służących do sterowania procesami rzeczywistymi. Ponadto parametry te wskazują na tendencję zmian w trakcie procesu szlifowania. To uzasadnia potrzebę prowadzenia dalszych prac nad stworzeniem integralnego i kompleksowego opisu procesu szlifowania, uwzględniającego zjawisko regeneracji drgań, w celu poszukiwania dróg skutecznej poprawy parametrów kształtu szlifowanej powierzchni.

Doświadczenia autorów artykułu [16] pozwoliły podjąć próbę rozwiązania problemu opracowania nowatorskiej metody przeciwdziałania efektom regeneracyjnych drgań karbujących przy szlifowaniu płaszczyzn i wałków. Istotą opracowanej metody jest wprowadzenie drgań prędkości przedmiotu obrabianego w kierunku stycznym do powierzchni szlifowanej i równoległym do prędkości szlifowania. Celowo wprowadzane drgania o określonej częstotliwości i amplitudzie są nałożone na stałą prędkość posuwową przedmiotu obrabianego. Prowadzone prace badawcze obejmują szlifowanie płaszczyzn oraz szlifowanie wgłębne wałków. Analiza teoretyczna tego zagadnienia jest prowadzona z wykorzystaniem modelu hybrydowego, którego parametry wynikają z klasycznego pomiaru właściwości dynamicznych badanych obiektów, oraz z doświadczalnej analizy modalnej, służącej do określenia właściwej postaci funkcji przejścia dla elementów zawartych w czarnej skrzynce. Ten sposób modelowania został wybrany jako najbardziej efektywny i wiarygodny z punktu widzenia analizy kształtu szlifowanych powierzchni.

LITERATURA

1. J. BIERA, J. VINOLAS, F.J. NIETO: Time-domain dynamic modelling of the external plunge grinding process. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **37**(1997)11, 1555÷1572.
2. S.J. DREW, M.A. MANNAN, K.L. ONG, B.J. STONE: An investigation of in-process measurement of ground surfaces in the presence of vibration. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **39**(1999), 1841÷1861.
3. S.J. DREW, B.J. STONE: Torsional (rotational) vibration: excitation of small rotating machines. *J. Sound Vibr.*, **201**(1997)4, 437÷463.
4. J. GIERGIEL., T. UHL: Identyfikacja układów mechanicznych. PWN Warszawa 1990.
5. N. HENNES: Analyse des dynamischen Verhaltens von Längschleifprozessen. *Doct. Thesis, RWTH Aachen* 1999.
6. I. INASAKI: Regenerative chatter in grinding. *Proc. 18 MTDR Conf.*, 1977, 423÷429.
7. I. INASAKI, B. KARPUSCHEWSKI, H.-S. LEE: Grinding chatter – origin and suppression. *Ann. CIRP*, **50**(2001)2, 1÷20.
8. Y. LI, S. M. GRACEWSKI, P. D. FUNKENBUSCH, J. RUCKMAN: Analysis of chatter in contour grinding of optical materials. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **42**(2002), 1095÷1103.

9. Y. S. LIAO, L. C. SHIANG: Computer simulation of self-excited and forced vibrations in the external cylindrical plunge grinding process. *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, **11**(1991)3, 297÷304.
10. H. H. LÖNS: CBN-Umfangsschleifen ohne Ratterschwingungen. *Werkstatt u. Betrieb*, **116**(1983)5, 279÷281.
11. S. MALKIN: Grinding technology-theory and applications of machining with abrasives. Ellis Horwood, 1989.
12. M. A. MANNAN, S. J. DREW, B. J. STONE: Torsional vibration effects in grinding?. *Ann. CIRP*, **49**(2000)1, 249÷252.
13. M. A. MANNAN, W. GT. FAN, B. J. STONE: The effects of torsional vibration on chatter in grinding. *J. Mater. Proc. Techn.*, No. 89-90, 1999, 303÷309.
14. M. R. MOVAAHHEDY, P. MOSADDEGH: Prediction of chatter in high speed milling including gyroscopic effects. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **46**(2006)9, 996÷1001.
15. K. E. OCZOŚ, J. PORZYCKI: Szlifowanie – podstawy i technika. WNT Warszawa 1986.
16. F. ORYŃSKI, G. BECHCIŃSKI: Badania symulacyjne drgań ściernicy szlifierki do płaszczyzn z wrzecionem łożyskowanym tocznie. XXIV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Łopuszna, 2001, 333÷340.
17. F. ORYŃSKI, G. BECHCIŃSKI: Doświadczalne badania procesu szlifowania wibracyjnego płaszczyzn. XXVI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Spała, 2003, 323÷330.
18. F. ORYŃSKI, W. PAWŁOWSKI: The influence of grinding process on forced vibration damping in headstock of grinding wheel of cylindrical grinder. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **39**(1999), 229÷235.
19. F. ORYŃSKI, W. PAWŁOWSKI: The mathematical description of dynamics of the cylindrical grinder. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **42**(2002)7, 773÷780.
20. F. ORYŃSKI, W. PAWŁOWSKI: Simulation and experimental research of the grinder's wheelhead dynamics. *Int. J. Vib. Contr.*, **10**(2004)6, 915÷930.
21. W. PAWŁOWSKI: Wpływ procesu szlifowania na tłumienie drgań wymuszonych wrzeciennika ściernicy szlifierek kłowych. Praca doktorska. Politechnika Łódzka 1999.
22. E. SALJE, W. DIETRICH, J. MEYER: Dynamische Vorgänge beim Aussenrund-Einsteichschleifen. *VDI-Z*, **124**(1982)17, 623÷628.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007÷2010 jako projekt badawczy własny nr NN503 118533. ■