

WYKORZYSTANIE SYGNAŁU DRGAŃ DO PROGNOZOWANIA BŁĘDU KSZTAŁTU PRZY TOCZENIU STALI ZAHARTOWANEJ

Adam HAMROL, Paweł TWARDOWSKI

Politechnika Poznańska, Inst. Technologii Mechanicznej, ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań

tel. 0-61 6652621, fax. 0-61 6652200, e-mail: adam.hamrol@sol.put.poznan.pl

1. Wprowadzenie

Przy toczeniu długich wałków wykonanych ze stali zahartowanej problemy sprawia dotrzymanie wymagań geometrycznych odnośnie dokładności kształtowej, mierzonej odchyłką prostoliniowości Δ_w . Czynnikiem powodującymi powstanie odchyłki są:

- wydłużenie cieplne ostrza - x_Θ ,
- skrócenie promieniowe ostrza - x_{KE} ,
- odkształcenie sprężyste suportu - x_s ,
- odksz. sprężyste ukl. wrzeciono-konik - x_{wk} .

W wyniku działania powyższych czynników naroże ostrza nie przemieszcza się po linii równoległej do kierunku posuwu ale po pewnej krzywej, której kształt zależy od właściwości cieplnych materiału ostrza, intensywności zużycia się ostrza oraz sztywności układu OUPN.

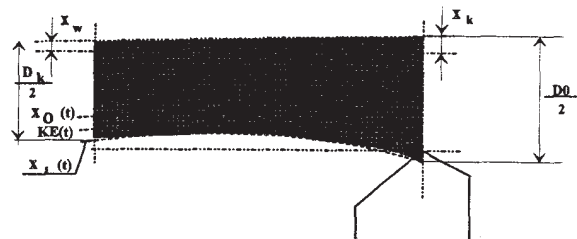
Wstępne badania własne oraz badania literaturowe [2,4,5,9] wykazały, że w stosowanym w praktyce zakresie warunków skrawania zużycie promieniowe ostrza oraz odkształcenie układu stanowią nie więcej niż 10% wydłużenia termicznego. Wydłużenie termiczne ostrza jest wywołane zjawiskami cieplnymi będącymi efektem zużycia ściernego ostrza. Jest ono najczęściej określane za pomocą wskaźnika V/B_c . W wyniku ścierania się ostrza rośnie powierzchnia styku przedmiotu obrabianego z powierzchnią przyłożenia ostrza, a co za tym idzie zwiększa się tarcie oraz ilość wydzielonego ciepła, wytwarzanego w strefie skrawania. Po pewnym czasie, zależnym od parametrów skrawania, przepływ ciepła w strefie skrawania stabilizuje się a odkształcenie termiczne x_Θ osiąga wartość ustaloną. Błąd Δ_w może być w związku z tym opisany funkcją:

$$\Delta_w(l) = \Delta_{wu} [1 - \exp(-l \cdot B)] \quad (1)$$

gdzie:

- l - droga skrawania ($0 \leq l \leq L$),
- L - całkowita droga skrawania,
- Δ_{wu} - wartość odchyłki zarysu (błędu kształtu) w stanie ustalonym,

B - jest współczynnikiem intensywności narastania krzywej.

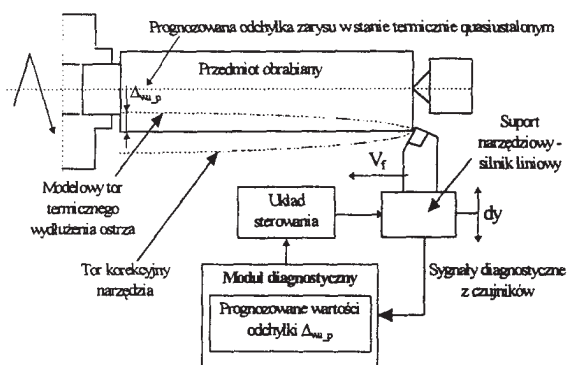


Rys. 1 Schemat powstawania odchyłki kształtu

Jedną ze stosowanych metod zmniejszenia powstającego w ten sposób błędu kształtu polega na zapewnieniu stabilnych warunków termicznych (minimalny gradient temperatury), szczególnie w fazie wchodzenia ostrza w materiał obrabiany. Stabilność taką można osiągnąć poprzez wstępne podgrzanie ostrza [3], lub chłodzenie go podczas pracy [1]. Inne rozwiązania polegają np. na kompensacji błędu kształtu w trakcie procesu [8] w oparciu o system laserowy. Jego wadą jest duży koszt oraz zawodność w warunkach przemysłowych, lub na korekcji położenia ostrza względem powierzchni obrabianej [6, 7].

2. Idea sterowania błędem kształtu

Autorzy postawili sobie za cel opracowanie metody ograniczania błędu kształtu Δ_w z zastosowaniem silnika liniowego. Metoda polega na sterowaniu położeniem suportu narzędzia w kierunku y tak, aby kompensować powstającą odchyłkę kształtu. Tor przemieszczania suportu jest wyznaczany na podstawie prognozowanej wartości błędu kształtu w stanie ustalonym - Δ_{wu_p} (rys. 2)



Rys.2 .Idea sterowania błędem kształtu

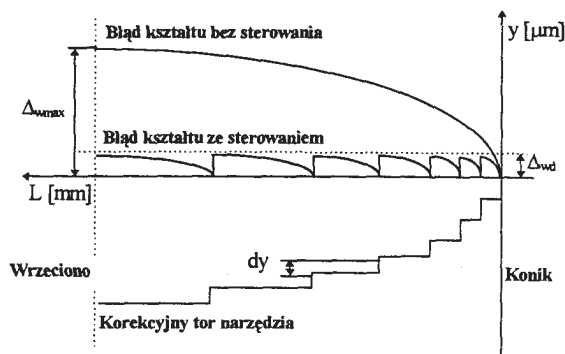
Do prognozowania wykorzystano informacje o stanie ostrza w chwili rozpoczęcia cyklu toczenia. Informacje tę można uzyskać np. z sygnałów sił skrawania, emisji akustycznej, drgań itp. Z doświadczeń autorów a także informacji prezentowanych w literaturze wynika bowiem, że istnieją związki przyczynowo - skutkowe pomiędzy stanem ostrza określonym wskaźnikiem starcia powierzchni przyłożenia VB_c oraz błędem kształtu Δ_w a wybranymi miarami wymienionych sygnałów. Pomiar składowych sił skrawania wiąże się jednak z koniecznością umieszczenia czujnika w „obwodzie sił skrawania” co może mieć niekorzystny wpływ m.in. na sztywność całego układu OUPN. Sygnały emisji akustycznej „niosą” z kolei skorelowane z wielkością starcia informacje w wysokim i szerokim zakresie częstotliwości, dlatego są trudne do zarejestrowania. Stąd najczęściej jest wykorzystywana jakaś forma ich demodulacji, np. uśrednianie czy wyznaczanie wartości skutecznej. W związku z tym uzyskiwane wyniki mają charakter jakościowy i nie mogą być ilościowo porównywane pomiędzy różnymi stanowiskami. Z wymienionych względów, a także kierując się łatwością i niezawodnością pomiaru w warunkach produkcyjnych do badań wybrano sygnał drgań.

Korygowanie toru przesuwu suportu $y(t)$ realizowane jest według funkcji stanowiącej „lustrzane odbicie” funkcji (1).

$$y(l) = \Delta_{wu,p} \cdot [1 - \exp(-l \cdot B)] \quad (2)$$

W praktyce, z uwagi na skończoną dokładność serwomechanizmów tor korekcyjny ma postać „schodkową”. Tor korekcyjny, można zaprogramować na dwa sposoby. Pierwszy polega na wykorzystaniu pakietu CAD/CAM, któremu zadaje się postać funkcji wraz z warunkami brzegowymi. Następnie pakiet ten zapisuje zadaną funkcję w taki sposób aby układy sterujące mogły ją zrealizować, najczęściej punkt po punkcie z zadanym krokiem. Drugi sposób polega na „ręcznym” wprowadzeniu do układu sterowania

zadanej funkcji uwzględniając dokładność serwomechanizmów (dla silnika liniowego $\sim 1 \mu m$). Przyjmując elementarny skok dy (np. $1 \mu m$), można ze wzoru 2 obliczyć wartości l drogi skrawania, po przejściu której należy dokonać kolejnej korekty położenia suportu w kierunku y o wartość dy (lub wielokrotność dy). Przeprowadzając stosowane obliczenia dla całej drogi skrawania L otrzymuje się zbiór punktów toru korekcyjnego (rys. 3).



L - droga toczenia (długość przedmiotu)

Δ_{wd} - dopuszczalny błąd kształtu

Δ_{wmax} - maksymalny błąd kształtu uzyskany przy toczeniu bez korekcji toru ostrza

dy - elementarny skok narzędzia wynikający z dokładności obrabiarki

Rys. 3. Tor korekcyjny dla $\Delta_{w,p} = 15 \mu m$ i wynikowy błąd kształtu $\Delta_{w,k}$

3. Badania

W celu określenia zależności pomiędzy sygnałami drgań a maksymalnym błędem kształtu przeprowadzono badania na tokarce TUM35D1, podczas dokładnego toczenia wzdłużnego na sucho ostrzami ceramicznymi MC2 (płytką: SNGN 120712) firmy Hertel, tulei ($\varnothing_{zew}=55mm$, $\varnothing_{wew}=25mm$, $L=150mm$) z zahartowanej stali ŁH15 ($61 \pm 1HRC$). Obróbkę realizowano przy stałych parametrach skrawania:

$$v_c = 175 \text{ m/min}, f = 0.08 \text{ mm/obr}, a_p = 0.1 \text{ mm}.$$

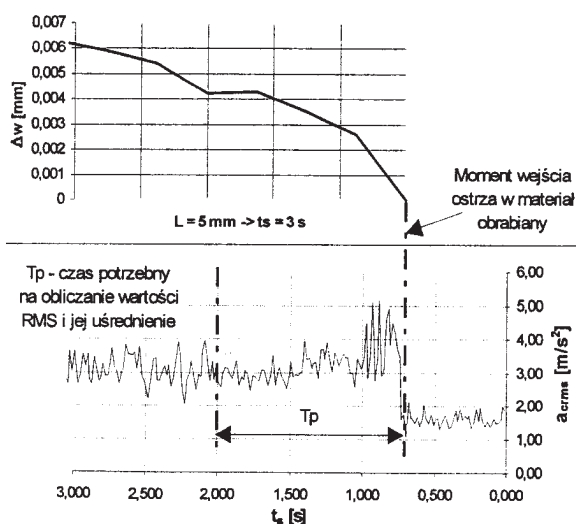
Badania przeprowadzono dla trzech losowo wybranych ostrzy. Czas skrawania każdym ostrzem wynosił 30 min. W każdym przypadku uzyskiwano zużycie $VB_c \approx 0,35mm$. Co każde przejście mierzono: zużycie ostrza VB_c (za pomocą mikroskopu warsztatowego o dokładności $\pm 0,01mm$) oraz błąd kształtu Δ_w (za pomocą czujnika inkrementalnego firmy Heidenhain o dokładności $\pm 0,5 \mu m$). Sygnały drgań mierzono w trakcie całego procesu za pomocą trójskładowego czujnika przyspieszeń drgań firmy B&K zamocowanego na gwint na oprawce noża. Wyznaczano przyspieszenia drgań w trzech kierunkach: głównym - a_c ,

posuwowym - a_f i odporowym - a_p . Dla każdego kierunku szacowano 3 miary :

- uśrednioną wartość średniokwadratową (a_{c_RMS} , a_{f_RMS} , a_{p_RMS}),
- uśrednioną wartość maksymalną (a_{c_max} , a_{f_max} , a_{p_max}),
- odchylenie standardowe wartości średniokwadratowej ($a_{c_σ}$, $a_{f_σ}$, $a_{p_σ}$).

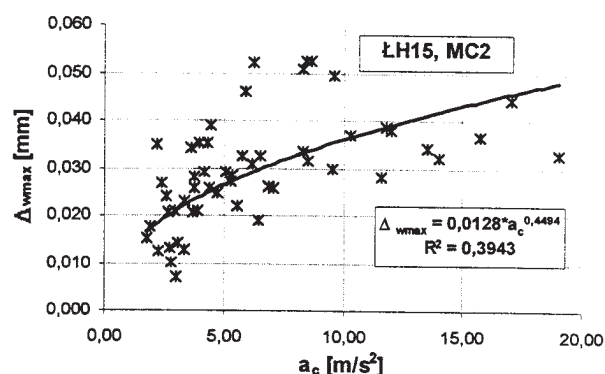
Oznacza to, że dla każdego przejścia wyznacza się pięć miar punktowych.

Ustalając wartość dopuszczalną $\Delta_{wd} = 10 \mu\text{m}$ i analizując wszystkie zarejestrowane zarysy stwierdzono, że przekroczenie wartości dopuszczalnej nie następowało przed upływem 5 sekund od chwili wejścia ostrza w materiał obrabiany. Dlatego przyjęto, że wyznaczenie miar sygnałów drgań, prognozowanie błędu kształtu Δ_{wu_p} i rozpoczęcie działań w celu jego skorygowania muszą być przeprowadzone po pierwszych 2 - 2,5 sekundach, na odcinku skrawania nazywanym dalej „odcinkiem testowym T_p ” (rys. 4).



Rys.4. Pomiar drgań na odcinku testowym

Przykładową zależność typu $\Delta_w = f(a_{citr})$, przedstawia rysunek 5. Widać, że korelacja pomiędzy badanymi wielkościami jest mała. Podobne zależności uzyskano również dla pozostałych z 9-ciu miar sygnału drgań. Żadna nie wykazała na tyle dużej korelacji z maksymalnym błędem kształtu aby na jej podstawie możliwe było prowadzenie skutecznego sterowania przemieszczaniem suportu. W związku z tym, postanowiono wykorzystać model wielowymiarowy w postaci sieci neuronowej.



Rys. 5. Zależności pomiędzy badanymi wielkościami

4. Testowanie zaproponowanego rozwiązania

Założono, że na wejście sieci jest podawanych 9 wcześniej określonych miar. Na wyjściu sieci wyprowadza prognozowane wartości Δ_{wu_p} , klasyfikowane do wstępnie przyjętych przedziałów

Przyjęcie liczby przedziałów na wyjściu sieci (tutaj sześciu) jest sprawą arbitralną i w związku z tym może być dyskusyjne. Zwiększanie liczby przedziałów (w granicy do nieskończoności, tzn. prognozowanie Δ_{wu_p} w sposób ciągły), wydłuża jednak znacznie czas uczenia sieci a niekoniecznie zwiększa skuteczność sterowania. Zadaniem sterowania nie jest bowiem minimalizacja błęd kształtu do wartości bliskich zero, a jedynie utrzymanie błęd kształtu w określonych granicach (0 , Δ_{wd}). Ponieważ we wszystkich z przeprowadzonych prób, największy zarejestrowany błąd kształtu wynosił $53 \mu\text{m}$, wyznaczono 6 przedziałów wartości Δ_{wu_p} (szerokość każdego jest mniejsza od Δ_{wd}) i odpowiadające im tory korekcyjne. Jeżeli rzeczywisty błąd Δ_{wu} wynosi np. $49 \mu\text{m}$ a sieć neuronowa zakwalifikuje go do przedziału nr 5, wówczas nastąpi korekcja jak dla $\Delta_{wu_p} = 45 \mu\text{m}$ i końcowy błąd kształtu po korekcji wyniesie teoretycznie $\Delta_{w_k} = 4 \mu\text{m}$.

Jako zbiór uczący zastosowano 40 faktów (wektorów stanu) odpowiadających realizacji trwałości dla dwóch pierwszych ostrzy. Zbiór testujący składał się z 20 faktów (wektorów stanu). Kierując się kryterium maksymalnej sprawności sieci, po serii treningów ostatecznie ustalono następującą strukturę: sieć czterowarstwowa z dwoma warstwami ukrytymi po 20 neuronów w każdej.

Na etapie testowania „nauczona” sieć miała za zadanie rozpoznać, na podstawie prezentowanych jej miar drganiowych ze zbioru testującego, wartości Δ_{wu_p} i zaklasyfikować je do odpowiedniego przedziału. Podczas testowania okazało się, że na 20 wektorów stanu 3 zostały zaklasyfikowane

nieprawidłowo, to znaczy $\Delta_{wu_p} \neq \Delta_{wu}$, co daje sprawność sieci $\eta = 85\%$. Nieprawidłowe rozpoznania można podzielić na 2 kategorie:

1. krytyczne - $\Delta_{wu_p} \neq \Delta_{wu}$ i po przeprowadzeniu korekty toru według Δ_{wu_p} przekroczenie dopuszczalnego błędu kształtu ($\Delta_{wk} > \Delta_{wd}$).
2. niekrytyczne - $\Delta_{wu_p} \neq \Delta_{wu}$, ale po przeprowadzeniu korekty toru według Δ_{wu_p} , zmniejszenie błędu kształtu poniżej wartości dopuszczalnej ($\Delta_{wk} < \Delta_{wd}$).

5. Podsumowanie i wnioski uogólniające

W pracy wykazano możliwość sterowania błędem kształtu w trybie on-line co może mieć istotny wpływ zarówno na dokładność jak i wydajność obróbki. Należy uwzględnić jednak, że analiza dotyczyła szczególnego przypadku, tzn. konkretnego skojarzenia materiał obrabiany - materiał ostrza i konkretnej wartości dopuszczalnej $\Delta_{w,d} = 0,01$ mm. W rzeczywistości wartość ta musi wynikać z wymogów konstrukcyjno technologicznych jakie nakłada się na wykonywany przedmiot. W celu zwiększenia dokładności korygowanych błędów można by w badanym zakresie zwiększyć liczbę przedziałów (np. co 5 μ m).

Problemy związane z ekspansją termiczną ostrza w głąb materiału obrabianego, a co za tym idzie, powstawaniem błędu kształtu, dotyczą szerokiej gamy materiałów obrabianych, m.in. omawianej stali łożyskowej ŁH15 a także stali konstrukcyjnej S5, stali szybko tnącej SW7M itp. Materiałem ostrza jest najczęściej ceramika czarna, która do obróbki tych gatunków stali wykazuje największą przydatność. Dla każdego z tych gatunków stali proces zużycia ostrza przebiega nieco odmiennie, choć ogólny charakter krzywej zużycia jest podobny. Odmiennosc ta powoduje, że model diagnostyczny opracowany dla jednego gatunku nie może być wykorzystany do innego. Zbiór uczący dla sieci neuronowej musi dotyczyć konkretnego skojarzenia na konkretnej obrabiarce, przy konkretnych parametrach obróbki. Budowa takiego zbioru w warunkach przemysłowych nie jest uciążliwa i nie należy traktować tego jako wadę.

Konkludując, należy stwierdzić, że idea sterowania błędem kształtu zaprezentowana w niniejszym artykule, choć zweryfikowana dla

konkretnego skojarzenia, może być rozszerzona na dowolny materiał ze stali zahartowanej, obrabiany ceramiką czarną w warunkach toczenia dokładnego.

Literatura

- [1] Akasawa T., Takeshita H., Uehara K. : *Hot Machining with Cooled Cutting Tools*. Annals of the CIRP vol. 36/1/1987, s. 37-40.
- [2] Asao T., Mizugaki Y., Sakamoto M.: *Precision Turning by Means of a Simplified Predictive Function of Machining Error*. Annals of the CIRP Vol. 41/1/1992, s. 447-450.
- [3] Basov V.V., Zaslavskij I.I., Szejnik V.I.: *Issledovanie vlijanija temperaturno udlinnenija instrumenta iz elbora-R na izmenene diametra detali pri točenii*. Vestnik mašinostroenija nr 7, 1978, str. 53-55.
- [4] Hamrol A., Twardowski P.: *Shape error for turning hardened steel based on neural network model*, Materiały V International Conference on Monitoring and Automatic Supervision in Manufacturing AC' 98, Miedzyszyn k/Warszawy 20-21.08. 1995, s.123-128.
- [5] Kawalec M. i inni: *Teoretyczno-doświadczalne podstawy kształtowania warstwy wierzchniej przedmiotów ostrzami supertwardymi i ceramicznymi w dokładnej obróbce wiórowej*. Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego KBN nr 3 0981 9101. Poznań 1993.
- [6] Klocke F., Liermann J. : *Kompensation Thermisch bedingter Formabweichungen beim Hartdrehen*. Materiały informacyjne RWTH Aachen.
- [7] Sata T., Takeuchi Y., Sakamoto M., Weck M. : *Improvement of Working Accuracy on NC Lathe by Compensation for the Thermal Expansion of Tool*. Annals of the CIRP vol. 30/1/1981, s. 445-449.
- [8] Shiraishi M. : *In-Process Control of Workpiece Dimension in Turning*. Annals of the CIRP vol. 28/1/1979, s. 333-337.
- [9] Twardowski P.: *Diagnozowanie stanu ostrza i powierzchni obrobionej podczas dokładnego toczenia zahartowanych stali*. Praca doktorska, Instytut Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, 1998.