

Modelowanie procesów szlifowania

BOGDAN KRUSZYŃSKI*

Różne metody modelowania operacji szlifowania powierzchni cylindrycznych zewnętrznych, powierzchni płaskich oraz szlifowania kół zębatach. Zastosowanie metody elementów skończonych, sztucznych sieci neuronowych oraz analizy regresji. Modelowanie sił szlifowania, rozkładu temperatury oraz jakości powierzchni obrabianej. Przykłady obliczeń przeprowadzonych z wykorzystaniem opracowanych modeli.

Modelowanie procesu szlifowania powierzchni płaskich kompozytów magnetycznych [1]

Modelowanie, które ma na celu określenie rozkładu ciepła i temperatury w szlifowanym przedmiocie, opiera się z reguły na teorii ruchomego źródła ciepła. Takie modelowanie do kompozytów magnetycznych wykonanych z naprzemiennie ułożonych płytek stalowych i magnetycznych (rys. 1) wymaga uwzględnienia całkowicie różnych właściwości tych materiałów: bardzo twardej i kruchej ceramiki magnetycznej o słabej przewodności cieplnej oraz miękkiej i plastycznej stali o dobrej przewodności cieplnej, z której wykonane są separatory.

Model cieplny procesu szlifowania kompozytu magnetycznego przedstawiono na rys. 1a, a przykładowe wyniki obliczeń na rys. 1b. Przyjęto, że źródło ciepła na styku ściernicy i przedmiotu obrabianego ma kształt trójkąta, który przesuwają się wzdłuż powierzchni obrabianej z prędkością

przedmiotu v_f . Podczas tego przemieszczania się nad warstwami stali i ceramiki magnetycznej rozkład strumienia ciepła zmienia się w sposób ciągły. W modelu uwzględniono ponadto odprowadzenie ciepła w wyniku konwekcji powierzchni przedmiotu obrabianego, z wyłączeniem powierzchni styku ściernicy z przedmiotem obrabianym.

Rozkład temperatury w przedmiocie obrabianym może być wyznaczony z ogólnie znanego równania różniczkowego Fouriera-Kirchhofa, do rozwiązania którego można zastosować metodę elementów skończonych (MES):

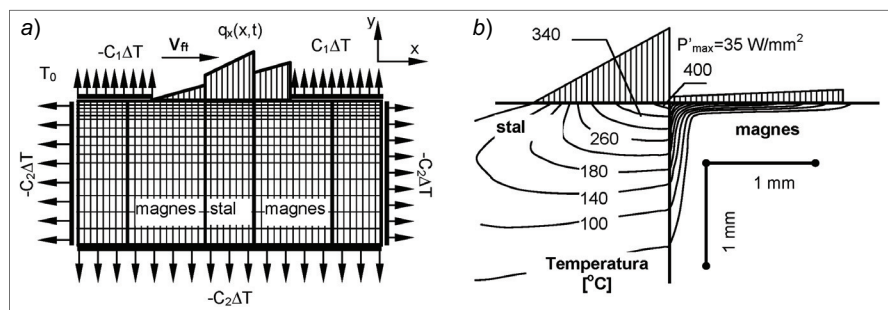
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_w \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

gdzie: T – temperatura, t – czas, α_w – dyfuzyjność cieplna, x, y, z – współrzędne prostokątne.

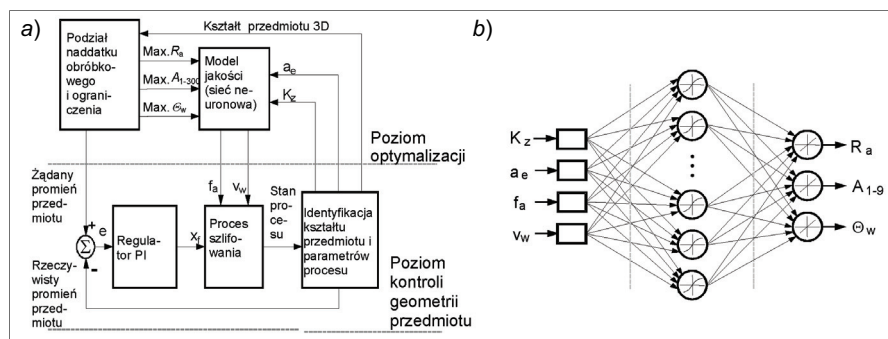
Z wyników obliczeń przedstawionych na rys. 1b wynika, że w ceramice magnetycznej głębokość zmian temperatury wywołana procesem szlifowania jest o wiele mniejsza niż w przypadku stali. Tylko w pobliżu styku elementu magnetycznego z separatorem stalowym obserwuje się podwyższoną temperaturę, z uwagi na wymianę ciepła pomiędzy tymi elementami. Taki rozkład temperatury jest szczególnie niekorzystny dla elementu ceramicznego, w którym występuje duży gradient temperatury powodujący naprężenia cieplne, często przekraczające wytrzymałość materiału. Najwyższe wartości gradientu temperatury i naprężeń cieplnych występują w narożu elementu ceramicznego, w pobliżu styku z separatorem stalowym, co wyjaśnia częste występowanie wykruszeń w tym obszarze podczas szlifowania.

Modelowanie procesu szlifowania powierzchni cylindrycznych z wykorzystaniem sieci neuronowych [2]

Jednym z podstawowych zadań systemów sterowania numerycznego jest zminimalizowanie wpływu operatora na wynik szlifowania. Jednak z uwagi na wpływ wielu czynników na wynik obróbki, odpowiedni dobór warunków szlifowania, podziału naddatku obróbkowego, a także kompensacja wpływu zakłóceń są ciągle problemem do rozwiązania. Obecnie trwają intensywne badania nad zastosowaniem metod sztucznej inteligencji do rozwiązania tych zagadnień – m.in. z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. System nadzoru procesu szlifowania (rys. 2a) może wykorzystywać dane otrzymywane na podstawie modelowania z wykorzystaniem takiej sieci (rys. 2b).



Rys. 1. Modelowanie procesu szlifowania kompozytu magnetycznego: a) warunki cieplne b) wyniki obliczeń; C_1, C_2 – współczynniki konwekcji, T_0 – temperatura otoczenia, ΔT – różnica temperatur, P'_{max} – maksymalna wartość strumienia energii źródła ciepła



Rys. 2. Struktura systemu nadzoru procesu szlifowania (a) i model neuronowy jakości przedmiotu obrabianego (b)

Zadaniem poziomu optymalizacji (rys. 2a) jest określenie optymalnych warunków obróbki. Podstawowym elementem tego poziomu jest model jakości przedmiotu obrabianego (rys. 2b), zbudowany w oparciu o sztuczną sieć neuronową. Model ten umożliwia określenie wyników obróbki, tzn. chropowatości powierzchni R_a , średniej wartości błędów kształtu i falistości (A_{1-9}) oraz temperatury szlifowania Θ_w . Model ma cztery wielkości wejściowe: zdolność skrawną ściernicy K_z , głębokość szlifowania a_e , posuw osiowy f_a oraz prędkość przedmiotu v_w , reprezentowane przez wektor $\mathbf{u} = \{u_1, u_2, u_3, u_4\} = \{K_z, a_e, f_a, v_w\}$. Trzy wielkości wyjściowe są opisane wektorem $\mathbf{y} = \{y_1, y_2, y_3\} = \{R_a, A_{1-9}, Q_w\}$.

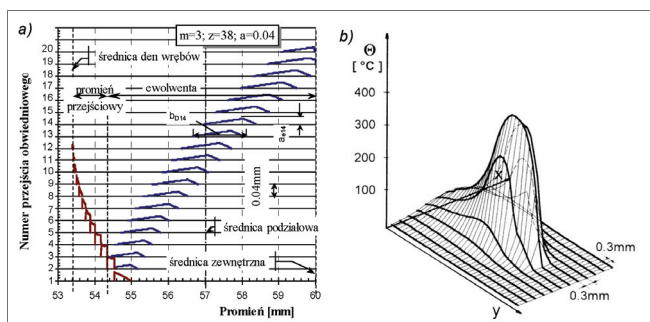
Model procesu szlifowania kół zębatych wg metody Nilesa [3, 4]

Metoda obwiedniowo-podziałowa szlifowania kół zębatych wg tzw. metody Nilesa jest skomplikowanym kinematycznie procesem obróbkowym. Jego efektem jest nierównomierny podział naddatku obróbkowego na poszczególne przejścia obwiedniowe (rys. 3a). W konsekwencji, przekrój warstwy skrawanej, a także krzywizna ściernicy oraz prędkość skrawania zmieniają się zarówno w kolejnych przejściach obwiedniowych ściernicy, jak i wzdłuż szerokości styku ściernicy z przedmiotem obrabianym w pojedynczym przejściu obwiedniowym. Powoduje to, że modelowanie tego procesu jest bardziej skomplikowane niż w przypadku typowych metod szlifowania.

Jedną z podstawowych wielkości wejściowych do tworzenia modelu cieplnego procesu jest styczna siła szlifowania. Siłę tę można obliczyć na podstawie analizy zmienności przekrojów warstwy skrawanej i innych warunków obróbki, wykorzystując zależność (2):

$$F_t = F_0 v_w \int_0^{b_{Di}} \left(\frac{a_{ei}}{v_{si}} \right)^t db_{Di} \quad (2)$$

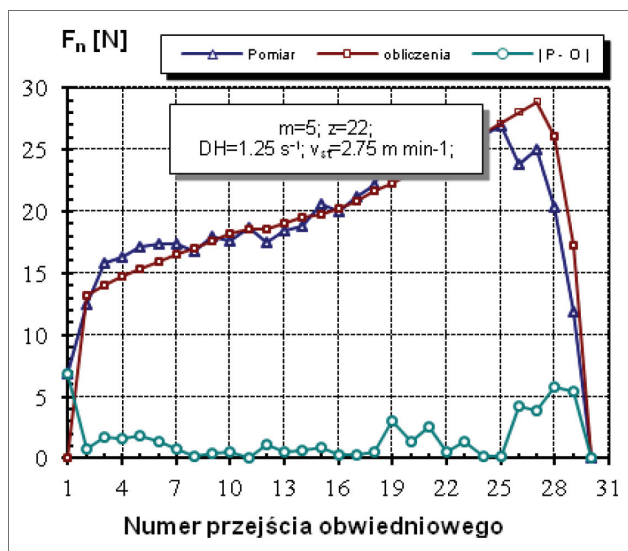
gdzie: F_t jest styczną siłą szlifowania, F_0 i f są stałymi i oznaczają numer przejścia obwiedniowego, a_{ei} jest rzeczywistą głębokością szlifowania w danym punkcie szerokości styku ściernicy z przedmiotem obrabianym b_{Di} , v_w jest prędkością przedmiotu, a v_{si} jest lokalną prędkością ściernicy.



Rys. 3. Przekroje warstwy skrawanej w poszczególnych przejściach obwiedniowych podczas szlifowania kół zębatych wg metody Nilesa (a) i obliczony rozkład temperatury na powierzchni zęba (b)

Przeprowadzone badania doświadczalne, służące do wyznaczenia parametrów modelu, a następnie do weryfikacji eksperymentalnej obliczeń pokazały poprawność przyjętych założeń. Na rys. 4 przedstawiono porównanie obliczonych i zmierzonych sił szlifowania podczas szli-

wania pojedynczego zarysu zęba. Przedstawiona w dolnej części wykresu różnica tych wielkości wskazuje na zadowalającą jakość opracowanego modelu.



Rys. 4. Porównanie zmierzonych i obliczonych sił szlifowania w kolejnych przejściach obwiedniowych ściernicy

Wielkość stycznej siły szlifowania może posłużyć do obliczeń energii szlifowania i do określenia rozkładu strumienia ciepła wnikaącego do przedmiotu obrabianego w każdym przejściu obwiedniowym ściernicy. Aby określić rozkład temperatury w obrabianym zębie, należało stworzyć odpowiedni model, wykorzystujący analizę zmienności warunków obróbki w poszczególnych przejściach obwiedniowych ściernicy. Na podstawie takiej analizy zaproponowano uproszczony rozkład strumienia energii na powierzchni styku ściernicy z przedmiotem.

Przyjmując taki rozkład strumienia źródła ciepła wnikaącego w przedmiot obrabiany, poruszającego się z prędkością odpowiadającą prędkości przedmiotu v_w można, stosując np. metodę elementów skończonych, obliczyć rozkład temperatury w zębie szlifowanego koła zębatego w dowolnym przejściu obwiedniowym ściernicy (rys. 3b), wykorzystując równanie (1).

Przedstawione przykłady modelowania różnych procesów szlifowania pokazują możliwości odmiennego podejścia do tego zagadnienia. W zależności od oczekiwanych wielkości wyjściowych zastosowanie różnych metod modelowania pozwala na osiągnięcie pozytywnych rezultatów. Prace eksperymentalne są niezbędne zarówno na etapie budowania modeli – w celu określenia ich parametrów – jak i na etapie weryfikacji ich poprawności.

Badania realizowane w ramach projektu „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Nr PO-IG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

LITERATURA

1. B. KRUSZYŃSKI, J. PAZGIER: Temperatures in Grinding of Magnetic Composites – Theoretical and Experimental Approach, *Annals of the CIRP* **52** (2003)1, 263 + 266.
2. B. KRUSZYŃSKI, P. LAJMERT: An intelligent supervision system for cylindrical traverse grinding operation. *Annals of the CIRP* **54**(2005)1, 305 + 308.
3. B. KRUSZYŃSKI, ST. MIDERA: Forces in Gear Grinding. *Annals of the CIRP*, **47**(1998)1, 287 + 290.
4. B. KRUSZYŃSKI: Model of gear grinding process. *Annals of the CIRP*, **44**(1995)1, 321 + 324.