

MODELOWANIE ROZPRASZANIA CIEPŁA WYWIĄZUJĄCEGO SIĘ W PROCESIE CYKLICZNEGO OBCIĄGANIA ŚCIERNICY Z ELEKTROKORUNDU DIAMENTOWYM OBCIĄGACZEM JEDNOZIARNOWYM

Andrzej ROSIAK¹, Ryszard DĘBKOWSKI²

1. WPROWADZENIE

Proces obciążania, jak się wydaje, nie jest dogłębnie poznany od strony energetycznej, umożliwiającej wyraźne wydzielenie tej składowej energii dostarczanej, która jest pracą użytkową (kruszenia oraz rozdrabniania materiału ściernicy).

Proporcje składowych rozpraszanej, energii w szeroko rozumianym otoczeniu są zapewne zależne od wielu czynników. Należy spodziewać się, że te proporcje są zależne od różnicy twardości diamentu i korundu oraz od wielkości ziaren tych materiałów. Istotny może być także kształt oraz ułożenie, względem obrabianej powierzchni, powierzchni trącej i ewentualnej krawędzi tnącej.

Znaczna zapewne część energii napędowej jest zamieniana na ciepło tarcia diamentu o korund oraz ziaren korundu między sobą. Tarcie (tu głównie ślizgowe) powoduje gwałtowny przyrost energii cząstek znajdujących się w strefie „obróbkowej”.

Część z tych cząstek o podwyższonej entalpii jest usuwana (odpływa) ze strefy obróbkowej w postaci pyłu.

Te cząstki, które są trwale zespolone z materiałem tarczy i z materiałem narzędzia uczestniczą w przekazywaniu nabytej energii innym cząstkom i następnym elementom układu, w kolejności „od źródła do celu”.

Rozpraszanie energii odbywa się:

¹ Politechnika Łódzka, Katedra Techniki Ciepłej i Chłodnictwa, 90-924 Łódź,
ul. Stefanowskiego 1/15

² Politechnika Łódzka, Katedra Technologii Maszyn, 90-924 Łódź, ul. Stefanowskiego 1/15

- ze strugą ścieranego na pył materiału, w wyniku działania sił „mechanicznych”;
- przez przewodzenie, przez promieniowanie oraz konwekcyjnie.

Strumień rozpraszanej energii ma zatem trzy składowe.

Strumień ciepła ma dwie składowe. Pierwsza składowa, kondukcyjno-radiacyjna \dot{Q}_{Naobc} płynie od powierzchni tarcia, od wierzchołka ziarna diamentowego, poprzez materiał lutowia i poprzez stalowy trzpień narzędzia - do masywnej obudowy obrabiarki. Druga składowa, kondukcyjno-radiacyjno-konwekcyjna \dot{Q}_{Natar} rozdziela się, w strefie obróbki, na część płynącą kondukcyjnie do wirującej tarczy ściernicy i część konwekcyjną, płynącą przez warstwę przyścienną powietrza w warunkach znacznych jego prędkości.

Radiacyjny przepływ ciepła dotyczy głównie warunków (i chwil) wysokiej temperatury w strefie tarcia. Ten strumień ciepła ma swój dominujący kierunek, prostopadły do powierzchni trących. Ze względu na mikroodbicia odbywa się także w innych kierunkach: do ciała z bliskiego i dalszego otoczenia.

1.1. CEL PRACY

Ogólnie sformułowanym celem pracy jest dyskusowanie tworzonych i rozwiązywanego zagadnienia brzegowo-początkowego, tzw. prostego. Należy pozyskać i dyskutować wyniki rozwiązywania modelu matematyczno-fizycznego, opisującego proces generowania i rozpraszania energii cieplnej, wywiązującej się przy cyklicznie realizowanej „suchej” obróbce ściernic, z użyciem diamentowego obciążacza jednoziarnistego.

Model powinien być adekwatny tzn. odpowiadający warunkom i wynikom przeprowadzonych pomiarów na rzeczywistym stanowisku badawczym, opisanym w niniejszych materiałach konferencyjnych [1] (na tym etapie pomiary są traktowane jako rozpoznawcze).

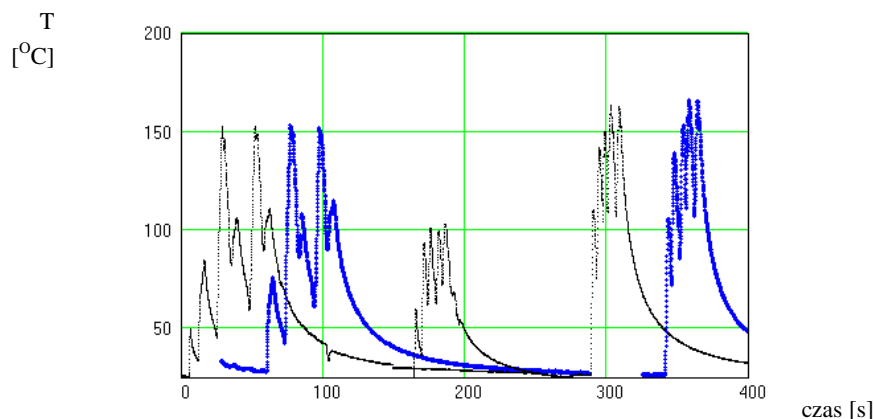
Przyszłościowy cel pracy może dotyczyć włączenia, po gruntownym, eksperymentalnym rozpoznaniu cech rozpatrywanego procesu, metody rozwiązywania zagadnień odwrotnych. Metoda ta, na bazie punktowej (zwykle zaszumionej błędami pomiarowymi) informacji o temperaturach obiektu, mierzonych zwykle tuż pod jego powierzchnią, umożliwi odtworzenie (zidentyfikowanie) chwilowych strumieni ciepła na wybranym brzegu (na powierzchni) obiektu.

2. WŁASNE INFORMACJE POMIAROWE

Uzyskane informacje pomiarowe [1] stanowią bazę do oceny przydatności wyników rozwiązywania tworzonych modelu procesu i dalszych prac. Informacje te dotyczą:

1) **mocy napędowej N**; ta moc, jak się okazało, naturalnie zależy od strumienia masy kruszonego materiału; drugim elementem wpływającym na zmiany mocy napędowej

jest rodzaj materiału ściernicy (twardość i ziarnistość); wartości mocy napędowej zawierały się w zakresie od 100 do 700 W;



Rys. 1. Mierzona temperatura lutowia, dla różnych materiałów ściernicy i z różnymi prędkościami posuwu (zastosowano, dla czytelności, sztuczne przesunięcia pomiarów na osi czasu); $t[^{\circ}\text{C}]=f(\tau[\text{s}])$

- 2) **temperatury tzw. „procesowej”**, mierzonej kamerą termowizyjną nakierowaną na obszar obróbki; w plikach rejestracyjnych występuje maksymalna oraz uśredniona temperatura obszaru obróbki; istotna jest informacja, że średnia temperatura procesowa nie przekroczyła 350°C ;
- 3) **temperatury lutowia** (a po opracowaniu danych, również jej chwilowej zmiany w kelwinach na sekundę) mierzonej termoelementem, wlutowanym tak, aby spoina pomiarowa była blisko ziarna diamentowego; istotna jest informacja, że ta temperatura w żadnym z pomiarów nie przekroczyła poziomu 180°C .

3. OPIS PROCESU CIEPLNO-PRZEPLYWOWEGO

Realizacja procesu obciągania w warunkach przemysłowych odbywa się w wielu cyklach (okresach). Każdy dwuetapowy okres zawiera:

- 1) etap obróbki (oznaczany dalej kodem **Na** od słowa nagrzewanie) o czasie trwania $\Delta\tau_{Na}$, zależnym od grubości tarczy g oraz od szybkości posuwu poprzecznego;
- 2) etap rozdzielania tarczy od narzędzia (międzyobróbkowy, oznaczany dalej kodem **St** od słowa stygnięcie) o czasie trwania $\Delta\tau_{St}$.

W tych dwóch etapach występują cztery (oznakowane kodami) podprocesy:

- 1) **NaObc** (*nagrzewanie obciągacza*) - transport ciepła w układzie nieruchomym: **ŹRÓDŁO_CIEPŁA** → **Ziarno_diamantowe** → **Lutowie** → **Oprawa** → **Łoże_obrabiarki**.
- 2) **NaTar** (*nagrzewanie tarczy ściernicy*) – transport ciepła w układzie z ruchomym źródłem (w rzeczywistości mamy do czynienia z układem kinematycznie odwróconym); transport ciepła w układzie:

ŹRÓDŁO_CIEPŁA → **Material_tarczy_korundowej** napływający (i odpływający) ze stałą szybkością obwodową („termicznie nowy”, przynajmniej w ramach pojedynczego obrotu).

3) **StObc** (*stygnięcie obciągacza*) – transport ciepła w warunkach przewodzenia ciepła, radiacji oraz swobodnej konwekcji cieplnej.

4) **StTar** (*stygnięcie obracającej się tarczy ściernicy*) – transport ciepła w warunkach przewodzenia i wymuszonej konwekcji cieplnej.

3.1. ROZPOZNANIE NIEUSTALONYCH WARUNKÓW TRANSPORTU CIEPŁA W CZASIE TRWANIA ETAPU OBRÓBKI

Źródłem ciepła rozpatrywanego obiektu (układu) jest jego ściśle wydzielona część (lub całość), która generuje albo pochłania ciepło.

Wydajność objętościowego źródła ciepła jest sprowadzana do liczby (skalara) reprezentującej moc cieplną, przypadającą na jednostkę objętości q_v [W/m³].

W odniesieniu do punktu w przestrzeni jest to granica, do której zdąża iloraz genero-

wanej mocy cieplnej i objętości $q_v = \lim_{dV \rightarrow 0} \frac{d\dot{Q}_v}{dV}$ (gdy ta ostatnia zdąża do zera).

Poziom temperatury w elementarnej objętości dV , generującej ciepło, zależy nie tylko od wydajności źródła ciepła q_v . Zależy także od dwóch charakterystycznych właściwości substancji:

- zdolności do akumulowania energii (iloczyn gęstości i ciepła właściwego $M = \rho c$ [J/m³/K], wyrażający pojemność cieplną, odniesioną do jednostki objętości);
- zdolności do transportu ciepła wyrażonej przez wartość współczynnika przewodzenia ciepła λ [W/m/K]).

Te dwie (zwykle przeciwstawne) właściwości ujmuje wielkość termofizyczna nazywana współczynnikiem dyfuzyjności termicznej (albo wyrównania temperatury) $a = \lambda/M$ [m²/s].

W przypadku rozpatrywanego procesu strumień ciepła tarcia jest fizycznie objętościowy. Energia cieplna powstaje w pewnej niewielkiej objętości, zawartej pomiędzy wirującą tarczą a czołową powierzchnią narzędzia. W warunkach kruszenia i rozdrabniania ta objętość jest ciągle na nowo wypełniana ruchomym pyłowym złożem korundu. Mniejsze lub większe zagęszczenie tego złoża jest wynikiem sił działających na powierzchniach granicznych oraz sił międzyziarnowych.

Współczynnik wyrównania ciepła a korundu traci swój fizyczny sens. Powodem jest skokowa zmiana warunków transportu ciepła, z klasycznego przewodnictwa do przewodnictwa z konwekcją w ruchomej warstwie (warunki fluidyzacji).

Postulujemy, aby tę strukturę ziarnistą włączyć do badań eksperymentalnych i symulacyjnych.

W dalszej części tego dokumentu obiektami zainteresowania pozostaną dwa obiekty: narzędzie oraz wirująca tarcza.

3.2. MODEL MATEMATYCZNY PROCESU STYKOWEGO (NARZĘDZIE-TARCZA)

Dla rozpatrywanego przypadku „stykowego” zakłada się wirtualne, powierzchniowe źródło ciepła (na wystającej ponad obudowę powierzchni ziarna).

Dla każdego z obiektów obowiązuje inne równanie bilansu energii cieplnej (równanie różniczkowe):

- równanie różniczkowe nieustalonego przewodzenia ciepła dla narzędzia, zawierającego 3 materiały ($i=1..3$), diament, lutowie, stal:

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = a_i \cdot \text{div}(\text{grad}(T_i)) \quad (1)$$

równanie (1) zapisano w postaci, zawierającej dywergencję gęstości strumienia ciepła q [W/m^2] (q jest iloczynem skalarnym gradientu temperatury przez współczynnik przewodzenia ciepła);

- równanie nieustalonego przewodzenia ciepła w warunkach ruchu, z prędkością w w źródła ciepła [2] po powierzchni tarczy:

$$\frac{\partial T_{ko}}{\partial \tau} - w \cdot \frac{\partial T_{ko}}{\partial (x - w \cdot t)} = a_{ko} \cdot \left(\frac{\partial^2 T_{ko}}{\partial (x - w \cdot t)^2} + \frac{\partial^2 T_{ko}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{ko}}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

Ze względu na przyjętą wspólną powierzchnię stykową F_{styk} obu ciał obowiązują warunki:

- tej samej temperatury obu ciał (na początku procesu, a także tuż po rozpoczęciu każdego etapu Na):

$$T_{1|\text{styk}} = T_{ko|\text{styk}} = T_s(\tau) \quad (3)$$

- sumowania strumieni ciepła płynących do obu ciał:

$$q_s = q_1 + q_2 = \lambda_1 \cdot \text{grad}(T_1) + \lambda_{ko} \cdot \text{grad}(T_{ko}) \quad (4)$$

- takiej samej pochodnej czasowej temperatury na powierzchni stykowej F_{styk} :

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} \Big|_{F_{\text{styk}}} = \frac{\partial T_{ko}}{\partial \tau} \Big|_{F_{\text{styk}}} \quad (5)$$

Z powyższych równań wynika, że o wartości czasowej zmiany temperatury w miejscu styku (równanie (5)) muszą decydować warunki na pozostałych (pozastykowych) brzegach ciał oraz ich współczynniki wyrównania temperatury.

W tym przypadku jest to zagadnienie z formalnie nieznanym strumieniem ciepła na powierzchni styku oraz nieznanym podziałem tego strumienia ciepła na elementy składowe.

W dalszej części opisano próbę obliczeniowego oszacowania składowej strumienia ciepła \dot{Q}_{Naobc} .

4. ROZWIĄZANIE MODELU PROCESU PRZEWODZENIA CIEPŁA W OBCIĄGACZU

Do rozwiązania modelu użyto programu FlexPDE [3].

Ze względu na trudność rozwiązania modelu transportu ciepła w obu obiektach jednocześnie, zdecydowano rozdzielić obliczenia, koncentrując się na obiekcie narzędzie.

Przyjęto osiowosymetryczną, trójwymiarową geometrię narzędzia, wprowadzając uproszczoną w stosunku do rzeczywistości, ale na tym etapie pracy umożliwiającą przeprowadzenie owocnych, jak się wydaje, testów oszacowania wielkości \dot{Q}_{Naobc} .

4.1. GEOMETRIA MODELU OBCIĄGACZA

Po rozpoznaniu informacji pomiarowej zdecydowano przyjąć możliwie prostą, tzw. „testową” geometrię narzędzia. Obciążacz „testowy” składa się z trzech elementów o regularnej geometrii. Ziarno diamentowe jest kulą o masie jednego karata ($m=1$ ct=0,2g; średnica $d=2,387$ mm). Lutowie wypełnia przestrzeń pomiędzy kulistym ziarnem a prętą obudowy stalowej. Objętość przestrzeni lutowia (wynika z przyjętego symetrycznie „luzu” $g_{Lu}=1$ mm) jest różnicą objętości walca o jednakowej wysokości i średnicy $D_{Lu}=H_{Lu}=(d + g_{Lu})$ oraz objętości półkuli ziarna diamentowego.

Wymiar wysokości pręta obsady stalowej przyjęto $L_{ob}=20$ mm. W tab. 1 podano objętości i masy a w tab. 2 przyjęte własności termofizyczne materiałów oraz pojemności cieplne.

Tabela 1. Model geometryczny obciążacza. Masy elementów składowych

Element	Objętość [mm ³]	Masa m [g]
Diament $r=2,3871$ mm	57	1 ct (karat) 0,2
Lutowie	216	1,8
Oprawa	1571	12

Pojemności cieplne elementów układu rzeczywistego są zapewne inne ale na tym etapie trudno o bardziej precyzyjne dane. Pojemności cieplne oraz własności termofizyczne elementów narzędzia determinują tzw. „odpowiedź termiczną” układu.

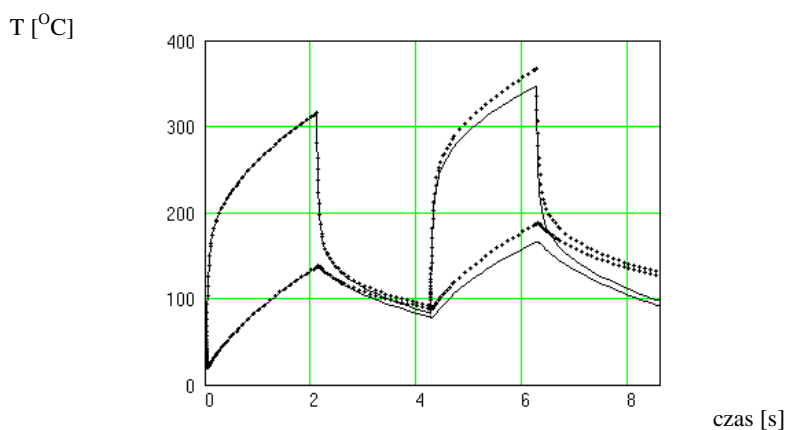
Tabela 2. Własności fizyczne

Materiał geometria obiektu	Gęstość	Ciepło właściwe c	Współczynnik przewodzenia ciepła λ	Iloczyn $\lambda \rho c$	Pojemność cieplna $M=m \cdot c$
	Kg/m ³	J/kg/K	W/m/K	kg ² /s ⁵ /K ²	J/K
Diament (<i>kula</i>)	3510	474	130 (1000)	$22 \cdot 10^7$ ($166 \cdot 10^7$)	0,095
Lutowie (<i>walec-kula</i>)	8500	400	120	$41 \cdot 10^7$	0,73
Stal (<i>obsada</i>)	7700	400	50	$15 \cdot 10^7$	4,8
Korund (<i>tarcza</i>)	2050	1250	1,8	$4,6 \cdot 10^6$	-

4.2. UZYSKANE WYNIKI ROZWIĄZANIA DLA DWÓCH PEŁNYCH CYKLI PROCESU

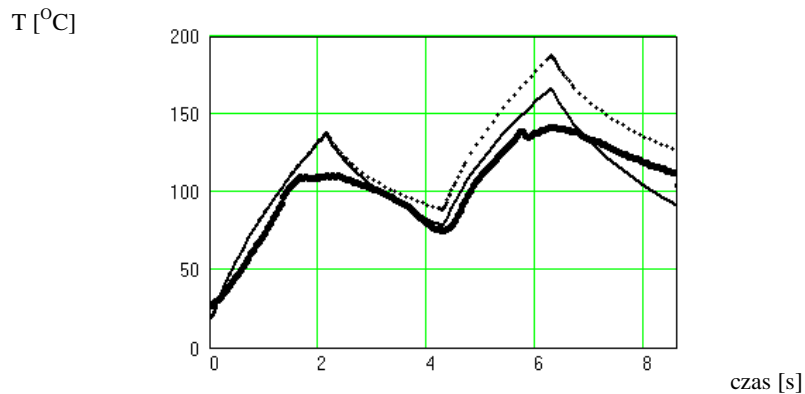
Na górnej, półkulistej powierzchni ziarna diamentowego postawiono warunek brzegowy II-go rodzaju, tzn. wartość gęstości strumienia ciepła ustawiono „próbnie” na 30% mierzonej mocy napędowej: $0,3 \cdot 451,7 = 135,5$ [W]. W tym pomiarze w obu cyklach ta moc była jednakowa. Przedziały czasu poszczególnych etapów: $\Delta\tau_{Na}(2,1; 2,0$ s); $\Delta\tau_{St}(2,15; 2,5$ s).

Na dolnej powierzchni narzędzia przyjęto warunek brzegowy I-go rodzaju: temperaturę otoczenia. Na wszystkich pozostałych powierzchniach strumień ciepła jest zerowy. Zerowym uznano także strumień ciepła w obu okresach stygnięcia narzędzia. Oznacza to, że zakumulowana energia cieplna płynie tylko do obudowy obrabiarki, przez kołowy przekrój poprzeczny obsady stalowej.



Rys. 2. $t(\tau)$ Obliczeniowe temperatury wierzchołka ziarna (*krzywe górne*) oraz lutowia (*dolne*)
 Krzywe ciągłe dotyczą $L_{ob}=15$ mm; krzywe kropkowane dotyczą $L_{ob}=25$ mm

Z wykresu (rys.2) wynika, że model „reaguje” fizykalnie poprawną odpowiedzią termiczną (temperaturą wierzchołka półkuli oraz temperaturą lutowia) na zmianę pojemności cieplnej stalowej obsady. O ile duża zmiana wymiaru L_{ob} (z 15 na 20 mm) jest prawie niezauważalna w obu procesach (Naobc i Nast.) pierwszego cyklu, to już w drugim cyklu różnice w dynamice zmian i wartościach temperatur są wyraźne.



Rys.3. $t(\tau)$ Porównanie mierzonej i obliczonej temperatury lutowia
 Krzywa nieregularna (gruba) reprezentuje pomiar
 Krzywa ciągła dotyczy $L_{ob}=15$ mm; krzywa kropkowana dotyczy $L_{ob}=25$ mm

To spostrzeżenie potwierdziło się również w opisywanym pomiarze (rys.3). To dobrze rokuje dla rezultatów modelu udokładnionego, z dominującym przewodzeniem ciepła.

5. PODSUMOWANIE

1. Uzyskane wyniki należy traktować orientacyjnie. Muszą być weryfikowane i uzupełnione o informacje: - na temat objętościowego źródła ciepła, - entalpii pyłu, - dynamiki procesów transportu ciepła do tarczy i od tarczy do otoczenia.
2. Okazało się, że dla pozyskania szczegółowej informacji pomiarowej należy rejestrować co najmniej dwa pełne cykle procesu.

LITERATURA

- [1] DĘBKOWSKI R., ROSIAK A., *Ocena obciążenia cieplnego diamentowego obciążacza jednoziarnistego*. W niniejszych materiałach konferencyjnych.
- [2] TALER J. DUDA P., *Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła*, WNT, Warszawa 2003.
- [3] Strona internetowa producenta programu komputerowego FlexPDE: www.pdesolutions.com
- [4] SHEIKO M. N., *On Calculation of Instantaneous Temperature on a Diamond Grit in Dressing Tool during Its Operation*, Journal of Superhard Materials, 2007, Vol. 29, No. 5, pp. 301—306. Allerton Press, Inc., 2007