

Badania entalpii strugi tworzącej się podczas obciążania ściernicy

Study on the stream enthalpy generated during dressing of the grinding wheel

RYSZARD DĘBKOWSKI
ANDRZEJ ROSIAK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.10.138>

English version available on: www.mechanik.media.pl

Opisano metodę pomiaru entalpii strugi cząstek powstającej podczas obciążania na sucho ściernicy diamentowym obciążaczem jednoziarnistym. Jako sensor ciepła zastosowano moduł Peltiera pracujący w trybie termoogniwa. Przedstawiono podstawowe informacje dotyczące budowy i zasad pomiaru modułem Peltiera, omówiono sposób jego wzorcowania oraz wyniki badań entalpii strugi tworzonej podczas procesu obciążania ściernicy ceramicznej z elektrokorundu szlachetnego, prowadzonego z różnymi nastawami posuwu i głębokości obciążania.

SŁOWA KLUCZOWE: obciążacz jednoziarnisty, strumień ciepła, temperatura

Described is the method of measuring the stream enthalpy of a particle formed during dry-dressing using a single point diamond dresser. In the described method, a Peltier module was used as a heat sensor. The authors presented basic information on the construction, principles of measurement with Peltier module and the way to calibrate it as well as the results of the studies on the enthalpy of the stream formed during the dressing of vitrified alumina grinding wheel. Conducted studies were performed with different feed and depth settings.
KEYWORDS: single point diamond dresser, heat flux, temperature

W czasie obciążania ściernicy wytwarza się znaczna ilość ciepła, która w istotnym stopniu przyczynia się do przyspieszenia zużycia wierzchołka ziarna diamentowego poprzez uaktywnienie procesów utleniania i grafityzacji oraz wywołanie uszkodzeń mechanicznych kryształu na skutek zmęczenia termicznego lub obniżenia twardości [1–4]. Ilość wytworzonego ciepła zależy od wielu czynników, w tym związanych z geometrią wierzchołka diamentu, wartością wielkości nastawnych procesu obciążania, a także właściwościami fizyczno-chemicznymi kompozytu ściernicy.

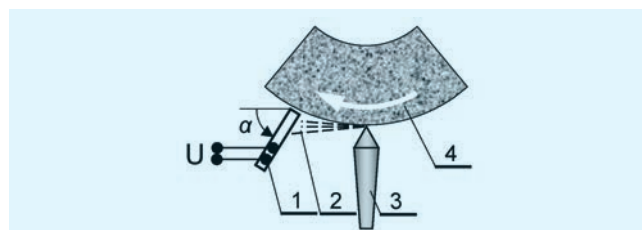
W przypadku wykonywania zabiegu obciążania bez zastosowania cieczy chłodząco-smarującej ciepło wytworzone w strefie kontaktu ziarna diamentowego ze ściernicą jest rozpraszane poprzez [2]:

- przewodzenie (w objętości ziarna dalej przez lut do korpusu obciążacza, oprawki i dalej do korpusu szlifierki, a także poprzez CPS ściernicy do jej korpusu, oprawy itd.),
- konwekcję (wymuszoną ruchem warstwy przyściennej powietrza wirującej ze ściernicą),
- promieniowanie cieplne do ciał z bliższego i dalszego otoczenia,
- pył rozkruszanego kompozytu ściernicy.

Prezentowana praca przedstawia ocenę ilości ciepła unoszonego przez cząstki strugi powstającej podczas obciążania ściernicy w warunkach obciążania na sucho.

Metoda pomiaru

Do pomiaru entalpii strugi cząstek wykorzystano moduł Peltiera, pracujący w trybie wielokrotnego elementu termoelektrycznego. W module Peltiera pomiędzy dwiema płytkami ceramicznymi o doskonałej izolacyjności elektrycznej oraz dobrej przewodności cieplnej znajdują się połączone szeregowo ogniwa półprzewodnikowe. Jeśli płytki ceramiczne mają różną temperaturę, to na zaciskach modułu pojawia się napięcie elektryczne proporcjonalne do różnicy tych temperatur. W opisywanym zastosowaniu moduł Peltiera należy umieścić pod określonym kątem α w torze ruchu strugi, w niewielkiej odległości od miejsca jej tworzenia. Cząstki strugi, odbijając/ślizgając/odkładając się na powierzchni płytki ceramicznej modułu, przekazują jej ciepło, czego efektem jest pojawienie się napięcia elektrycznego na jego zaciskach (rys. 1).



Rys. 1. Schemat metody pomiaru (1 – moduł Peltiera, 2 – struga, 3 – obciążacz, 4 – ściernica)

Przybliżoną wartość napięcia generowanego na zaciskach modułu określa się zależnością:

$$U = a_m(T_h - T_c) \quad (1)$$

gdzie: a_m – średnia wartość współczynnika Seebecka ogniwa; T_h – temperatura płytki strony „gorącej” modułu; T_c – temperatura płytki strony „zimnej” modułu.

Gdy określa się w ten sposób entalpię strugi cząstek, należy mieć na uwadze, że pomiar będzie obarczony błędem wynikającym z nieznannej:

- wielkości wywiązującego się ciepła na skutek tarcia strugi cząstek o powierzchnię płytki,
- ilości ciepła rozproszonego podczas przemieszczania się strugi na drodze pomiędzy wierzchołkiem diamentu a powierzchnią płytki modułu,
- ilości energii zakumulowanej przez pył, która nie została przekazana do modułu.

W celu wdrożenia opisanej zasady pomiaru zbudowano konstrukcję nośną dla modułu Peltiera mającego 127 ogniw. Kątowe ustawienie modułu ustalono po serii badań rozpoznawczych, w których oceniano wpływ kąta α (rys. 1) na wielkość napięcia generowanego przez moduł atakowany strugą produktów obciążania. Po przeprowadzeniu testów, w których zastosowano zróżnicowane warunki obciążania, stwierdzono, że najwyższe wartości

* Dr inż. Ryszard Dębowski (ryszard.debkowski@p.lodz.pl), dr inż. Andrzej Rosiak (andrzej.rosiak@p.lodz.pl) – Politechnika Łódzka

napięcia rejestrowano, gdy kąt odchylenia płytki modułu od kierunku ruchu strugi wynosił $\alpha = 67^\circ$. To znaczy, że przy takim ustawieniu moduł Peltiera przejawia największą zdolność przejmowania ciepła ze strugi.

Drogę, jaką przebywa struga pomiędzy wierzchołkiem diamentu a płytką modułu, osłonięto w konstrukcji izolowanym termicznie kanałem. Stronę zimną modułu zapatrzoneo w radiator, którego chłodzenie zapewniały ruch powietrza wywołany strugą przysięcienną wirującej ściernicy oraz praca wyciągu pyłu umieszczonego w pobliżu miejsca prowadzenia zabiegu obciążania. Napięcie termoelektryczne rejestrowano z wykorzystaniem komputera z kartą analogowo-cyfrową oraz aplikacji programu LabView.

Badania doświadczalne

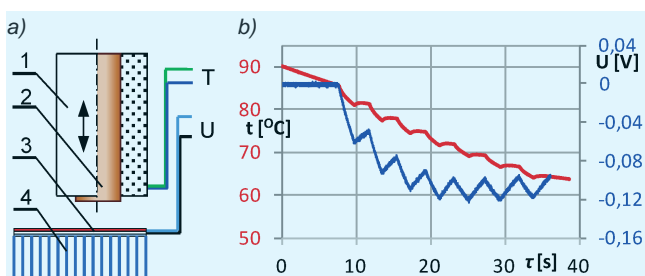
Badania doświadczalne podzielono na dwa etapy:

- wzorcowanie modułu Peltiera – mające na celu wyznaczenie zależności pomiędzy ilością dostarczanego do modułu ciepła a wielkością generowanego napięcia,
- badania zasadnicze – mające na celu ocenę wartości entalpii strugi w zależności od parametrów obciążania.

■ **Wzorcowanie modułu Peltiera.** Celem wzorcowania było wyznaczenie zależności napięcia na zaciskach modułu od ilości ciepła przejmowanego przez płytkę ceramiczną jego okładziny. Opracowanie takiej charakterystyki wymagało przeprowadzenia badań, w których zapewniono kontrolę dostarczanego do modułu strumienia ciepła. Jako układ dostarczający znaną ilość energii (układ bilansowy) zastosowano izolowany termicznie pręt miedziany o znanej pojemności cieplnej, z możliwością bieżącej kontroli jego temperatury. Wielkość pręta dobrano w oparciu o podstawowe charakterystyki zastosowanego modułu oraz wartości napięć otrzymanych w nieopisanych tutaj badaniach wstępnych. Powierzchnię walcową pręta osłonięto izolacją termiczną, aby ograniczyć przenikanie ciepła do otoczenia.

Badania polegały na periodycznym (lub ciągłym) stykaniu powierzchni czołowej nagrzanego wcześniej do różnych temperatur pręta z powierzchnią płytki ceramicznej modułu i ciągłym rejestrowaniu zmian jego temperatury oraz napięcia termoelektrycznego generowanego przez moduł. Pomiar temperatury pręta wykonywano z użyciem termopary miedź-konstantan umieszczonej na jego powierzchni walcowej, znajdującej się w bezpośrednim sąsiedztwie powierzchni czołowej stykającej się z modułem.

Na rys. 2 przedstawiono schemat sposobu realizacji badania oraz przykładowe wykresy otrzymanych wyników pomiarów temperatury pręta i napięcia termoelektrycznego modułu. Rejestrację temperatury oraz napięcia realizowano cyfrowo, z wykorzystaniem dwóch komputerowych torów pomiarowych.



Rys. 2. Układ do wzorcowania modułu Peltiera (1 – termoizolacja, 2 – pręt miedziany, 3 – moduł Peltiera, 4 – radiator) (a); zmiana napięcia termoelektrycznego modułu Peltiera i temperatury układu bilansowego (b)

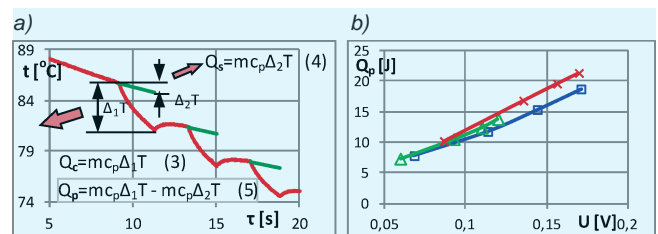
W trakcie styku z modułem strumień ciepła oddawanego przez układ bilansowy \dot{Q}_c miał dwie składowe:

- strumień ciepła przewodzonego do płytki ceramicznej modułu \dot{Q}_p ,
 - strumień ciepła przenikającego do otoczenia \dot{Q}_s ,
- co można zapisać w postaci:

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_p + \dot{Q}_s \quad (2)$$

Istotne z punktu widzenia wzorcowania modułu jest wyznaczenie ilości ciepła Q_p przekazanego do modułu Peltiera. Ciepło to obliczono metodą, której ideę przedstawiono na rys. 3a. Metoda ta nie uwzględnia występujących zmienności strumienia ciepła, jednak dla krótkich odcinków czasu, w jakich rozpatrywano styk i przekazywanie ciepła do modułu, zmiany te mają ograniczony zakres.

Na rys. 3a linią czerwoną oznaczono zmianę temperatury pręta układu bilansowego podczas periodycznego stykania z modułem Peltiera, natomiast liniami zielonymi – zmianę temperatury pręta wynikającą z oddawania ciepła do otoczenia. Linie zielone wykreślono na podstawie oddzielnie wykonanych badań swobodnego stygnięcia układu bilansowego.



Rys. 3. Wykres temperatury układu bilansowego w czasie 3 styków kontrolnych (a); charakterystyka modułu Peltiera: napięcie termoelektryczne–ciepło (b)

Całkowite ciepło Q_c , które oddaje układ bilansowy podczas pojedynczego styku z modułem Peltiera, opisuje równanie (3) zamieszczone na rys. 3a, natomiast równanie (4) wskazuje tę jego część, która została oddana w tym czasie do otoczenia Q_s . Użyte w równaniach symbole oznaczają: m – masa miedzianego pręta; c_p – ciepło właściwe miedzi; $\Delta_1 T$ – zmiana temperatury pręta podczas styku z modułem Peltiera; $\Delta_2 T$ – zmiana temperatury pręta w czasie swobodnego stygnięcia. Różnica wartości tych energii jest poszukiwaną wartością ciepła przekazanego do modułu Peltiera – równanie (5) na rys. 3a.

Ponieważ temperatura początkowa styku pręta z modułem i temperatura początku swobodnego stygnięcia są takie same, końcowy wzór obliczeniowy przyjmuje postać:

$$Q_p = m \cdot c_p \cdot (T_{ks} - T_k) \quad (6)$$

gdzie: T_k – temperatura pręta w momencie zakończenia styku z modułem Peltiera; T_{ks} – końcowa temperatura stygnącego swobodnie pręta w okresie równym stykowi pręta z modułem.

Na podstawie wyników badań i obliczeń wykreślono charakterystyki zależności uzyskanych pomiędzy napięciem na zaciskach a ilością energii cieplnej dostarczonej do modułu Peltiera – rys. 3b.

■ **Badania zasadnicze.** W badaniach wykorzystano obciążacz diamentowy jednoziarnisty. Testy przeprowadzono podczas obciążania ceramicznej ściernicy elektrokorundowej. Charakterystykę ściernicy oraz parametry procesu obciążania zestawiono w tabelicy.

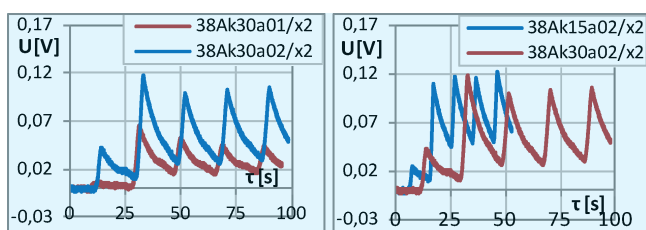
Aby uniknąć wpływu na wyniki mierzonych wielkości zmiany czynnej szerokości obciążacza, użyto narzędzia,

TABLICA. Warunki badań zasadniczych

Charakterystyka ściernicy	Parametry obciążania		
	k_d	a_d , mm	liczba skoków/dosuw
1 38A 60K VBE 350×127×40	1,5; 3,0	0,01; 0,02	1; 2

w którym starcie wierzchołka diamentu w kierunku posuwu wynosiło 1,1 mm. Badania wykonano na szlifierce do płaszczyszyn SPG 30×80.

Na rys. 4 przedstawiono dwa przykładowe wykresy reakcji termoelektrycznej modułu Peltiera na ciepło przekazywane przez strugę podczas zabiegów obciążania realizowanych z różnymi wartościami posuwu i głębokości obciążania. Sposób oznaczenia serii pomiarowych: materiał ścierny ściernicy/wskaźnik pokrycia przy obciążaniu/dosuw obciążania/liczba skoków na dosuw, np. 38Ak30a01/x2 oznacza elektrokorund szlachetny/wskaźnik pokrycia przy obciążaniu $k_d = 3,0$, dosuw obciążania $a_d = 0,01$ /podwójny skok.



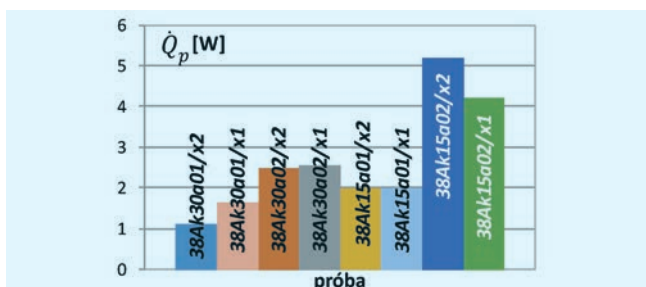
Rys. 4. Napięcie termoelektryczne modułu Peltiera wywołane kontaktem ze strugą produktów obciążania

Na podstawie tego rodzaju wykresów oraz charakterystyki ciepło-napięciowej zastosowanych w badaniach modułu Peltiera wykonano obliczenia strumienia ciepła wnikażącego do modułu dla wszystkich zbadanych wariantów obciążania. Strumień ciepła obliczono przez odniesienie ilości ciepła przekazanej modułowi w jednym przejściu obciążającym do czasu trwania tego przejścia (7). Do obliczeń wybrano wskazania modułu z okresu jego stabilnej pracy, tj. od 3. do 5. przejścia obciążającego.

$$\dot{Q}_p = \frac{Q_p}{\tau_p} \quad (7)$$

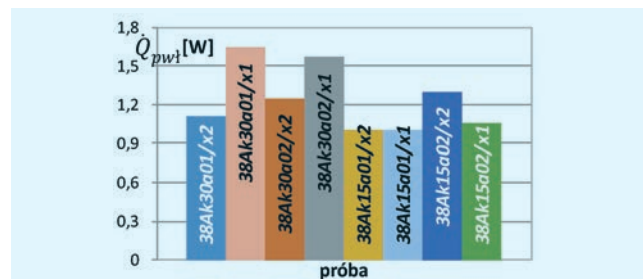
gdzie: Q_p – ciepło przekazywane do modułu Peltiera; τ_p – czas trwania przejścia obciążającego.

Wyniki obliczeń zilustrowano wykresami zamieszczonymi na rys. 5, natomiast na rys. 6 przedstawiono wykresy, które obrazują obliczenia odnoszące strumień ciepła do ilości materiału ściernicy niesionego przez strugę. Przyjęto, że wielkością bazową będzie ilość materiału usuwana podczas jednego przejścia obciążającego w najbardziej łagodnych warunkach obciążania ($k_d = 3,0$; $a_d = 0,01$). W pozostałych przyjętych warunkach obciążania ilość tego materiału była 2-krotnie (np. $k_d = 1,5$; $a_d = 0,01$ lub $k_d = 3,0$; $a_d = 0,02$) oraz 4-krotnie ($k_d = 1,5$; $a_d = 0,02$) większa.



Rys. 5. Wartość bezwzględna strumienia ciepła przekazywanego modułowi Peltiera

Wyniki badań odzwierciedlone na wykresie (rys. 5) wskazują, że strumień ciepła przekazywany do modułu ma większą wartość, gdy obciążanie odbywa się z większą głębokością a_d lub większym posuwem (wskaźnik k_d ma mniejszą wartość), natomiast strumień ciepła dla tych samych wartości dosuwu i posuwu ma podobne wartości, niezależnie od liczby skoków ściernicy na dosuw.



Rys. 6. Strumień ciepła przekazywany do modułu Peltiera odniesiony do ilości materiału ściernicy niesionego przez strugę

Z kolei wykres z rys. 6 informuje, że mniejszy posuw i większa głębokość obciążania przyczyniają się do zakumulowania przez cząstki strugi większej ilości ciepła, czego prawdopodobną przyczyną jest występowanie wyższej temperatury w miejscu styku wierzchołka diamentu ze ściernicą.

Wnioski

Badania wykazały przydatność modułu Peltiera do oceny entalpii strugi produktów obciążania. Otrzymane wyniki wskazują na dużą rozdzielczość metody umożliwiającą formułowanie wniosków o aspektach energetycznych procesu obciążania prowadzonego na sucho.

Wyniki badań wykazały zróżnicowaną wartość entalpii strugi cząsteczek ściernicy tworzonej w różnych warunkach obciążania, co stanowi podstawę do stwierdzenia, że entalpia odzwierciedla ilość ciepła generowanego w miejscu dekohezji materiału ściernicy przez wierzchołek diamentu obciążacza i stanowi przydatny parametr porównawczy tych procesów.

Wartości bezwzględne strumienia ciepła przekazywanego przez strugę modułowi Peltiera są niewielkie, co wskazuje, że rozpraszanie ciepła przez cząsteczki materiału ściernicy ma nieznaczący udział w bilansie energetycznym procesu obciążania – w badaniach pobór mocy związany z usuwaniem warstwy ściernicy zawierał się w granicach 150–400 W.

Dokładniejsze oszacowanie wielkości entalpii strugi wymaga przeprowadzenia również pomiarów tego ciepła, które nie zostało przekazane przez cząsteczki modułu podczas ich wzajemnego kontaktu. Pomiar taki można wykonać metodą kalorymetryczną. Urządzenie pomiarowe należy zaopatrzyć w naczynie kalorymetru, do którego będą zbierane cząstki strugi stykające się wcześniej z modułem Peltiera.

LITERATURA

- Linke B., Klocke F. „Temperatures and wear mechanisms In dressing of vitrified Bonded grinding Wheels”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 50 (2010): s. 552–558.
- Rosiak A., Dębowski R. „Modelowanie rozpraszania ciepła wywiązującego się w procesie cyklicznego obciążania ściernicy z elektrokorundu diamentowym obciążaczem jednoziamnistym”. *Mechanik*. 8–9 (2012).
- Sheiko M. “On calculation of instantaneous temperature on a diamond grit in dressing tool during its operation”. *Journal of Superhard Materials*. 29, 52 (2007): s. 301–306.
- Tkhagapsoev K. “On wear of diamond in dressing abrasive wheels”. *Sverkhтвердые Materialy*. 2 (1987): s. 30–35.