

Maria MACIĄG*

SPOSÓB WYZNACZANIA MAKSYMALNEGO PRZYROSTU TEMPERATURY W PROCESIE TARCIA METALI

METHOD OF DETERMINING THE MAXIMUM TEMPERATURE INCREMENT IN THE PROCESS OF METALLIC FRICTION

Słowa kluczowe:

tarcie, zużywanie, nagrzewanie, maksymalna temperatura

Key-words:

friction, wear, heating, maximum temperature

Streszczenie

W pracy przedstawiono opis tarcowego źródła ciepła i na jego podstawie opracowano oryginalny sposób wyznaczania przyrostu temperatury w strefie tarcia metali. Rozważono przypadki tarcia ze zużywaniem i bez zużywania, gdy występuje maksymalny przyrost temperatury. Uwzględniono szereg wielkości charakteryzujących procesy tarcia i zużywania

* Politechnika Radomska, Wydział Nauczycielski, Katedra Informatyki, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom, tel. 048 360 31 08, e-mail: maria-maciag@wp.pl.

oraz własności fizyczne metali. Należą do nich m.in.: współczynnik tarcia, współczynnik zużycia, praca tarcia, wielkości geometryczne charakteryzujące strefę tarcia, twardość, gęstość, ciepło właściwe i temperatura początkowa. Zamieszczono przykład liczbowy ilustrujący ilościowo maksymalne przyrosty temperatury wybranych metali, występujące podczas tarcia. Stwierdzono ważną rolę twardości w procesie nagrzewania tarcowego metali.

WPROWADZENIE

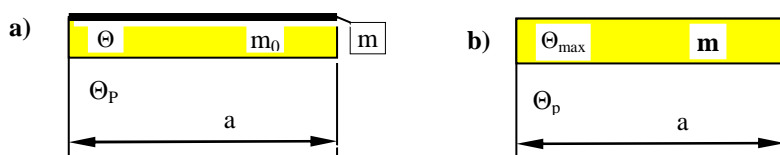
Pole temperatury w obszarach styku metali podczas tarcia decyduje o przebiegu tego procesu i towarzyszącego mu zużycia. W szczególności maksymalne wartości temperatury warunkują szybkość reakcji chemicznych i wpływają na mechanizm zużycia. Ocena tych wartości na podstawie bezpośrednich pomiarów jest trudna ze względu na niedostępność wybranych punktów warstwy wierzchniej dla przyrządów pomiarowych. Również badania zmian struktury materiału pod wpływem procesów cieplnych nie zapewniają dostatecznego rozpoznania pola temperatury. W tej sytuacji poszukuje się metod pośredniego ustalania maksymalnych wartości temperatury materiału na podstawie analizy procesu rozpraszania energii mechanicznej podczas tarcia. W niniejszym opracowaniu zaproponowano oryginalny sposób wyznaczania średniej temperatury strefy tarcia w przypadku występowania zużycia i jej maksymalnej wartości, gdy to zużycie nie następuje na podstawie analizy bilansu energii.

W rozważaniach uwzględniono niektóre własności fizyczne materiału: gęstość, ciepło właściwe, twardość, temperaturę początkową (równą temperaturze otoczenia), a także wybrane wielkości charakteryzujące tarcie i zużycie – współczynnik tarcia, pracę tarcia, współczynnik zużycia i udział pracy tarcia w procesie powstawania cząstek zużycia. Przedstawiono również przykłady obliczeniowe temperatury dla przypadków wybranych metali i ich własności.

MODEL TARCOWEGO ŹRÓDŁA CIEPŁA

Przyjmuje się, że podczas tarcia element pary tarcowej, którego wymiar kierunku wektora prędkości tarcia wynosi a , ma temperaturę początkową Θ_P , równą temperaturze otoczenia, która jest stała. Rozpraszanie energii mechanicznej następuje tylko w części tego elementu o masie m . Wsku-

tek tarcia masa ta jest objętościowym źródłem ciepła o temperaturze większej względem Θ_p . Wyróżnia się tu dwa przypadki – **Rys. 1**. W pierwszym przypadku, gdy zachodzi zużywanie, to masa $\mathbf{m} = m + m_0$, a jej temperatura wynosi Θ , gdzie m jest masą usuniętą wskutek zużywania, a m_0 – pozostałą częścią masy \mathbf{m} o temperaturze Θ . Sytuację tę zilustrowano na **Rys. 1a**. W drugim przypadku – **Rys. 1b**, masa $\mathbf{m} = m_0$, co oznacza, że nie zachodzi zużywanie ($m = 0$) i cała praca tarcia A_t przypadająca na dany element jest równa ciepłu tarcia Q_f . Temperatura masy m wynosi Θ_{\max} .



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie fragmentu ciała stałego uczestniczącego w tarcu:
a) przypadek tarcia, któremu towarzyszy zużywanie; b) przypadek tarcia, kiedy praca tarcia równa jest ciepłu tarcia

Fig. 1. Schematic illustration of a fragment of a solid body involved in friction:
a) the case of friction accompanied by wear; b) the case of friction where the work of friction equals the heat of friction

Jeżeli tarcie powoduje zużywanie tribologiczne, to część pracy tarcia, równa $\eta \cdot A_t$, przypada na to zużywanie, zatem ciepło tarcia jest mniejsze od pracy tarcia i wynosi $Q_f = (1 - \eta) \cdot A_t$. Współczynnik η spełnia nierówność $0 \leq \eta \leq 1$. Ilość ciepła tarcia można również wyrazić na podstawie analizy procesu nagrzewania masy \mathbf{m} od temperatury Θ_p do temperatury Θ . Jeżeli ciepło właściwe materiału wynosi c_p , to w pierwszym przypadku (**Rys. 1a**) ciepło tarcia opisują następujące zależności [**L. 1**]:

$$Q_f = c_p \cdot \mathbf{m} \cdot (\Theta - \Theta_p) = A_t \cdot (1 - \eta) \quad (1)$$

Stosunek masy usuniętego materiału m i masy strefy tarcia, jak wykazano w pracy [**L. 2**], jest równy liczbie zużycia v i jednocześnie współczynnikowi zużycia k , występującemu w formule J.F. Archarda:

$$v = k = \frac{m}{\mathbf{m}} \quad (2)$$

Uwzględniając we wzorze (1) zależność (2) oraz że $\mathbf{m} = \mathbf{m} + \mathbf{m}_o$, otrzymuje się nowy opis ciepła tarcia

$$Q_f = c_p \cdot \frac{m_o}{1-k} \cdot (\Theta - \Theta_p) = A_t \cdot (1 - \eta) \quad (3)$$

Wynika z powyższego temperatura strefy tarcia

$$\Theta = \Theta_p + \frac{A_t \cdot (1-k) \cdot (1-\eta)}{c_p \cdot m_o} \quad (4)$$

W szczególności, gdy nie występuje zużywanie, zachodzą równości: $k = 0$, $\mathbf{m} = \mathbf{m}_o$, $\eta = 0$, $A_t = Q_f$, $\Theta = \Theta_{\max}$. Zatem największa możliwa do uzyskania temperatura strefy tarcia wynosi

$$\Theta_{\max} = \Theta_p + \frac{A_t}{c_p \cdot m_o} \quad (5)$$

Jeżeli rozważyć pracę tarcia ustabilizowanego wykonaną na przesunięciu równym długości a ciała zmierzonej w kierunku wektora prędkości tarcia, a powierzchnia styku nominalnego, na której panuje nacisk jednostkowy p , wynosi A_n , to grubość strefy tarcia wynosi [L. 2]

$$\delta = \frac{a \cdot p}{H} \quad (6)$$

gdzie H – twardość materiału, natomiast masa m_o , uczestnicząca w rozpraszaniu energii, wynika ze wzoru

$$m_o = A_n \cdot \rho \cdot \frac{a \cdot p}{H} \quad (7)$$

gdzie ρ – gęstość materiału. Po wstawieniu (7) do (4) i (5) oraz uwzględnieniu, że praca tarcia $A_t = \mu \cdot A_n \cdot p \cdot a$, otrzymuje się nowe postacie wzorów na temperatury Θ i Θ_{\max}

$$\Theta = \Theta_p + \frac{\mu \cdot H \cdot (1-k) \cdot (1-\eta)}{c_p \cdot \rho} \quad (8)$$

$$\Theta_{\max} = \Theta_p + \frac{\mu \cdot H}{c_p \cdot \rho} \quad (9)$$

Maksymalny przyrost temperatury strefy tarcia jest zależny od współczynnika tarcia, twardości materiału, jego ciepła właściwego i gęstości

$$\Theta_{\max} - \Theta_p = \frac{\mu \cdot H}{c_p \cdot \rho} \quad (10)$$

Większe naprężenie ścinające materiał ($\mu \cdot H$) sprzyja jego nagrzewaniu, natomiast większa akumulacyjność cieplna ($c_p \cdot \rho$) przeciwnie – ogranicza przyrost temperatury spowodowany tarciem.

PRZYKŁADY WYZNACZANIA MAKSYMALNYCH PRZYROSTÓW TEMPERATURY

Jak wynika ze wzoru (8) wyznaczenie dowolnego przyrostu temperatury strefy tarcia w warunkach zużywania nie jest proste ze względu na występowanie nieznanej wartości współczynnika η . W tej sytuacji ograniczono się do przypadku obliczania maksymalnych przyrostów temperatury. Jest to możliwe do przeprowadzenia, gdyż znane są wartości wielkości występujących we wzorze (10). Dla ilustracji wykorzystano niektóre informacje z badań W. Żurowskiego [L. 3]. W Tabeli 1 zestawiono wartości współczynnika tarcia i twardości materiałów oraz ich gęstości i ciepła właściwe. Dodatkowo zamieszczono wartości temperatury topnienia badanych metali i odpowiadające im stosunki maksymalnego przyrostu temperatury podczas tarcia i temperatury topnienia.

Tabela 1. Przykłady wyznaczania maksymalnych przyrostów temperatury wybranych metali podczas tarcia

Table 1. Examples of determining maximum temperature increment of selected metals during friction

Metal	Θ_p	M	H	ρ	c_p	Θ_{\max}	$\Theta_{\max} - \Theta_p$	Θ_{top}	$(\Theta_{\max} - \Theta_p) / \Theta_{\text{top}}$
	K	-	MPa	kg/m ³	kJ/kg·K	K	K	K	
Glin	313	0,43	810	2700	0,896	456,973	143,97	931	0,155
Ołów	313	0,8	60	11340	0,129	345,812	32,812	600,3	0,055
Cynk	313	0,5	440	7130	0,385	393,144	80,144	692,4	0,116
Miedź	313	0,51	1260	8930	0,383	500,884	187,88	1356	0,139
Żelazo	313	0,6	1780	7860	0,452	613,615	300,61	1803	0,167

Z obliczeń wynika, że maksymalny przyrost temperatury $\Theta_{\max} - \Theta_p$ zawiera się w przedziale 32,812–300,61K, co stanowi od 0,055 do 0,167 temperatury topnienia danego metalu. Decydującą wielkością o wartości przyrostu $\Theta_{\max} - \Theta_p$ jest jego twardość. Zatem mniejszej twardości H odpowiada nie tylko mniejszy opór ścinania $\mu \cdot H$, ale również mniej intensywne nagrzewanie strefy tarcia. Wniosek ten otrzymany na podstawie zaproponowanego modelu potwierdza znaną prawidłowość, że w przypadku materiałów łożyskowych korzystne jest wprowadzenie do strefy tarcia dodatku w postaci metalu o małej twardości.

PODSUMOWANIE

Rozważania przedstawione w niniejszej pracy nawiązują do opracowanego wcześniej modelu tarcowego źródła ciepła [L. 1]. Zostały wprowadzone nowe elementy, uwzględniające informacje o geometrii strefy tarcia ciał stałych [L. 2]. W szczególności ważna rola przypada tu objętości i masie obszaru, w którym następuje rozpraszanie energii podczas tarcia. Przyjęto, że strefa tarcia jest objętościowym źródłem ciepła, a pozostałą część elementu trącego potraktowano jak jej otoczenie o ustabilizowanej temperaturze. W ten sposób uściślono dotychczasowy model tarcowego źródła ciepła. Wykonano obliczenia rachunkowe maksymalnego przyrostu temperatury strefy tarcia, korzystając z wyników eksperymentu, w którym temperatura trących się ciał była stabilizowana za pomocą wymiennika ciepła, co warunkowało spełnienie założeń będących podstawą opracowanego modelu. Na wyniki obliczeń wpływały oprócz temperatury otoczenia również własności fizyczne ciała (twardość, gęstość, ciepło właściwe) i współczynnik tarcia. Nie wpływały natomiast warunki wymiany ciepła z otoczeniem i proces zużywania, ponieważ je pominięto. Ogólny opis przyrostu temperatury strefy tarcia – wzór (8) uwzględnia zarówno chłodzenie, jak i zużywanie. Informacje o tych procesach zawierają się w dwóch wielkościach, są to współczynnik zużywania k i współczynnik η , charakteryzujący udział pracy tarcia w tworzeniu produktów zużycia. Ilościowa ocena współczynnika zużywania jest obecnie możliwa na podstawie eksperymentu. Dużą trudność przedstawia natomiast ustalenie wartości η , do czego niezbędne są badania kalorymetryczne ciepła tarcia. Z tego powodu w niniejszej pracy ograniczono się do obliczenia maksymalnego przyrostu temperatury strefy tarcia.

LITERATURA

1. Maciąg M.: Termodynamiczny opis tarcia ustabilizowanego i towarzyszących mu procesów. Monografia nr 111. Wyd. Politechniki Radomskiej, Radom 2008.
2. Sadowski J.: Die Verschleißzahl. Tribologie und Schmierungstechnik 2007 nr 4.
3. Żurowski W.: Energetyczny aspekt wzrostu odporności metali na zużywanie w procesie tarcia technicznie suchego. Rozprawa doktorska. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1996.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr N504 015 32/1818 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Recenzent:
Stanisław ŚCIESZKA

Summary

A description of a frictional heat source is presented and, based on this, an original method of determining the temperature increment in the metallic friction zone is developed. Cases are considered of friction involving wear and wear-free, where maximum the temperature increment occurs. A series of magnitudes characterising friction and wear processes, as well as physical properties of metals, are taken into account. These include, *inter alia*, coefficient of friction, coefficient of wear, work of friction, geometric characteristics of the friction zone, hardness, thickness, specific heat, and initial temperature. A quantitative example is included to illustrate the maximum temperature increments of selected metals during friction. An important role of thickness in the process of frictional heating of metals is established.

