

Wiesław Gogól, Tomasz Wiśniewski

Instytut Techniki Ciepłej

WPLYW RADIACJI TERMICZNEJ NA PROCES PRZEWODZENIA CIEPŁA PRZY PERIODYCZNYM STYKU OKREŚLONEGO UKŁADU DWU CIAŁ STAŁYCH

W pracy rozważano wymianę ciepła między okresowo stykającymi się powierzchniami czołowymi walców w przypadku uwzględnienia radiacji termicznej. Zamieszczono wyniki obliczeń numerycznych obrazujące wpływ właściwości cieplnych i emisyjności ciał, wzajemnego położenia obu ciał, termicznego oporu kontaktowego i poziomu temperatur na proces wymiany ciepła.

WYKAZ OZNACZEŃ

- a - dyfuzyjność cieplna
- D - średnica ciał
- h - oddalenie powierzchni styku przy rozwarciu
- h_m - maksymalne oddalenie powierzchni styku przy rozwarciu
- H_{TOK} - współczynnik przekazywania ciepła przy zetknięciu ciał (odwrotność termicznego oporu kontaktowego przy styku okresowym)
- $q_r(\tau)$ - chwilowa gęstość strumienia ciepła wymienianego na drodze radiacji
- \bar{q}_r - gęstość strumienia ciepła wymienianego na drodze radiacji (średnia dla czasu rozwarcia t_R)
- q_{rad} - gęstość strumienia ciepła wymienianego na drodze radiacji (średnia dla całego okresu t)

- $q_{sa}(\tau)$ - chwilowa gęstość strumienia ciepła przepływającego przez powierzchnie styku przy braku wymiany ciepła w czasie rozwarcia
 q_{sa} - gęstość strumienia ciepła wymienianego przy styku periodycznym w stanie quasi-ustalonym, przy braku wymiany ciepła na powierzchniach styku w czasie ich rozwarcia (średnia dla całego okresu t)
 $q_{sr}(\tau)$ - chwilowa gęstość strumienia ciepła przepływającego przez powierzchnie styku przy radiacyjnej wymianie ciepła w czasie rozwarcia
 q_{sr} - gęstość strumienia ciepła wymienianego przy styku periodycznym w stanie quasi-ustalonym, przy radiacyjnej wymianie ciepła na powierzchniach styku w czasie ich rozwarcia (średnia dla całego okresu t)
 q_u - gęstość strumienia ciepła przy trwałym zetknięciu ciał
 t - okres (łączny czas styku i rozwarcia ciał)
 t_R - czas rozwarcia
 t_s - czas styku
 T_0 - temperatura na skrajnej powierzchni ciała
 T_R - temperatura na powierzchni styku podczas rozwarcia
 T_S - temperatura na powierzchni styku podczas zetknięcia
 ϵ - emisyjność powierzchni styku
 $\epsilon_{1,2}$ - emisyjność zastępcza
 Φ_{1-2} - współczynnik konfiguracji
 λ - przewodność cieplna
 δ_0 - stała promieniowania
 τ - czas

Indeksy

- 1 - odnosi się do ciała 1
 2 - odnosi się do ciała 2

1. WSTĘP

Działanie różnych urządzeń mechanicznych (np. silników spalinowych tłokowych) oraz przebieg niektórych procesów obróbki plastycznej i skrawaniem dostarczają licznych praktycznych przykładów wymiany ciepła między okresowo stykającymi się ciałami stałymi. Najbardziej typowymi są: kucie, walcowanie, styk zaworów i gniazd, styk pierścieni, cylindrów i tłoków, oraz współpraca kół zębatych, sprzęgieł i hamulców.

Wymiana ciepła przy okresowym styku ciał stałych jest więc zjawiskiem często występującym w technice, lecz dotychczas bardzo słabo poznanym i opisanym, co wynika z jego wyjątkowej złożoności.

Zagadnienie przewodzenia ciepła przy okresowym styku stało się przedmiotem badań stosunkowo niedawno; pierwsze publikacje dotyczące wymiany ciepła przy styku okresowym pochodzą z lat 1970 i 1973 [3,4]. Rozpatrywane są w nich modele bardzo uproszczone. Rozwiązanie analityczne bardziej złożonego, tzn. bliższego rzeczywistości modelu ciał wymieniających ciepło przy styku okresowym podano między innymi w roku 1981 [8]. Skomplikowana postać rozwiązania nie pozwala jednak na łatwe i wygodne z niego korzystanie. Konieczne jest zastosowanie numerycznych obliczeń komputerowych. Mimo, że omawiane zagadnienie występuje w technice od dawna, to dokładne jego zbadanie staje się możliwe dopiero teraz, gdy dostępne są szybkie komputery.

Wymiana ciepła przy okresowym styku jest zagadnieniem skomplikowanym, nie tylko w wyniku samego przerywania kontaktu ciał (opór styku okresowego), ale także na skutek trudnych do zmierzenia zmian termicznego oporu kontaktowego przy styku okresowym i przede wszystkim występowania konwekcji i radiacji termicznej na powierzchniach styku w czasie rozwarcia ciał [2]. Ilość ciepła wymienianego na drodze promieniowania zależy od temperatur powierzchni styku, ich emisyjności, kształtu, wzajemnego położenia i odległości oraz właściwości radiacyjnych ośrodka znajdującego się między powierzchniami styku w czasie ich rozwarcia.

Należy zwrócić uwagę na fakt, iż podczas rozwarcia ciał, w trakcie ich oddalania i zbliżania zmienia się ich odległość, a więc w konsekwencji wartość współczynnika konfiguracji. W trakcie całego czasu rozwarcia ciał zmieniają się również temperatury na powierzchniach styku. Zmiany tych temperatur wynikają nie tylko z samego styku periodycznego, lecz na ich wartości może również wpływać obecność radiacyjnego strumienia ciepła.

Ilość ciepła wymienianego na drodze radiacji przy styku periodycznym zmienia się w czasie, ponieważ ciągłej zmianie ulegają temperatury powierzchni styku, jak też zmienia się odległość badanych ciał w części lub całości czasu rozwarcia.

2. SFORMUŁOWANIE ZAGADNIENIA

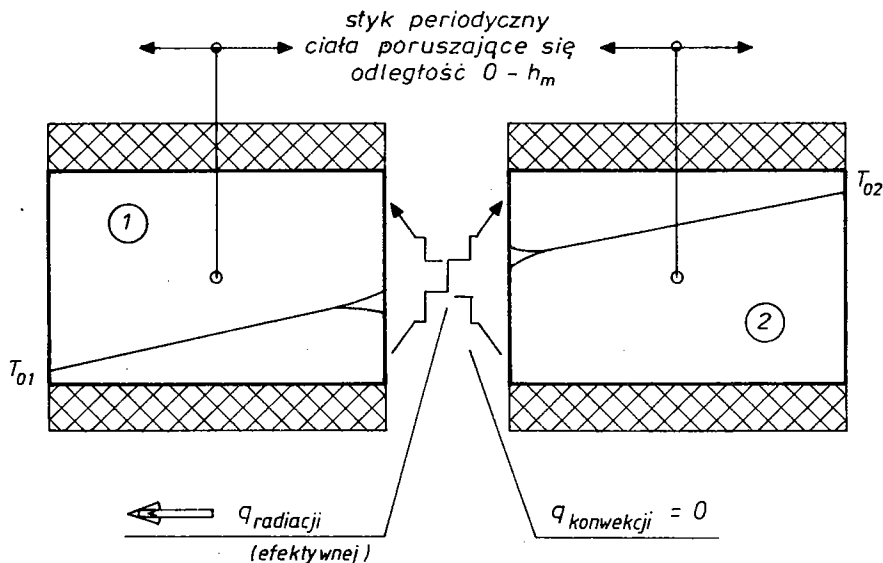
Ogólne rozwiązanie zagadnienia wymiany ciepła przy periodycznym styku ciał z udziałem radiacji byłoby bardzo skomplikowane. Uwzględnienie wszelkich możliwych warunków, jak np. radiacyjna wymiana ciepła z innymi ciałami podczas rozwarcia uczyniłoby ten problem bardzo złożonym.

W tej pracy przyjęto, iż wymiana ciepła na drodze promieniowania termicznego zachodzi tylko między periodycznie stykającymi się ciałami (otoczenie pominięto). Ośrodek znajdujący się pomiędzy nimi jest radiacyjnie obojętny.

Przeprowadzone zostały obliczenia dotyczące tylko określonego układu dwu ciał, który był już przedmiotem badań we wcześniejszych pracach teoretycznych i doświadczalnych [3,4, 9,10,11]. Pozwala to na ewentualne potwierdzenie zarówno obecnie, jak i w przyszłości wyników badań uzyskanych w pracach eksperymentalnych.

Należy zaznaczyć, że wykonane w tej pracy obliczenia mają w pewnym sensie charakter uniwersalny, ponieważ konkretnej wartości emisyjności zastępczej odpowiadać mogą różne współczynniki konfiguracji (zależne od geometrii układu) i emisyjności powierzchni styku ciał.

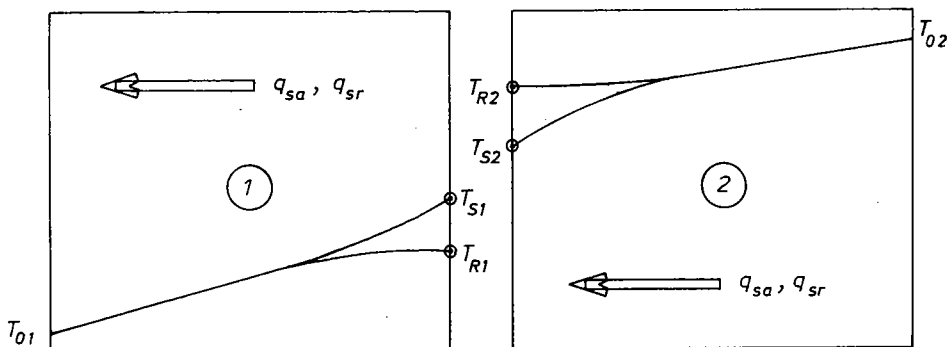
Przedmiotem tej pracy jest badanie wpływu radiacji na całkowitą wymianę ciepła między periodycznie stykającymi się ciałami w kształcie walców (rys.1). Powierzchnie boczne tych walców są doskonale izolowane; radiacja termiczna ma miejsce tylko pomiędzy powierzchniami czołowymi walców, czyli powierzchniami styku. Porównywane są pola temperatury i strumienie ciepła w warunkach adiabatycznych i w obecności radiacji w stanach quasi-ustalonych uzyskanych przy tych samych czasach styku i rozwarcia oraz tych samych (niezmiennych w czasie trwania procesu) temperaturach skrajnych T_{01} i T_{02} i termicznych oporach kontaktowych w czasie zetknięcia.



Rys.1. Rozpatrywany model wymiany ciepła między periodycznie stykającymi się ciałami stałymi w stanie quasi-ustalonym

Założono, iż nie ma konwekcyjnej wymiany ciepła na powierzchniach styku w czasie ich rozwarcia.

Wykonywane w tej pracy obliczenia dotyczą wyłącznie stanu quasi-ustalonego, tj. stanu, w którym pole temperatury w danym momencie cyklu n jest takie samo, jak w identycznym momencie cyklu $n+1$. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe pola temperatury w ostatnim momencie zwarcia i ostatnim momencie rozwarcia ciał w stanie quasi-ustalonym.



Rys.2. Przykładowe pole temperatury w periodycznie stykających się ciałach o różnych temperaturach T_{01} i T_{02} w stanie quasi-ustalonym

Ponadto przyjęto kilka założeń upraszczających:

- Ciała oddalają się i zbliżają w nieskończenie krótkim czasie. W czasie rozwarcia odległość między ciałami jest stała i niezmienna (założenie to jest najbliższe większości przypadków występujących w technice). W ogólnym przypadku oddalanie i zbliżanie ciał może być dowolną funkcją czasu. W rozdz. 4 tej pracy przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń wartości współczynnika konfiguracji i emisyjności zastępczej dla przypadku, gdy ciała zbliżają się i oddalają zgodnie z funkcją sinus).
- Wartości emisyjności ciał nie ulegają zmianie w czasie. W połączeniu z poprzednim założeniem o natychmiastowym oddaleniu ciał daje to w efekcie stałą w trakcie całego czasu rozwarcia wartość emisyjności zastępczej.
- Do obliczeń przyjęto umiarkowany poziom temperatur ($T < 800^{\circ}\text{C}$).

Poszukiwanymi (obliczanymi) wielkościami są pola temperatury $T(x,t)$ w periodycznie stykających się ciałach w obecności radiacji i przy jej braku, co pozwala w efekcie obliczyć wartości gęstości strumieni ciepła przepływających przez ciała w obu przypadkach oraz ewentualnie liczby podobieństwa opisujące wymianę ciepła w tych warunkach [11].

3. SPOSÓB PRZEPROWADZENIA OBLICZEŃ

Obliczenia wymiany ciepła przy periodycznym styku ciał stałych w obecności radiacji wymagały znacznych modyfikacji i uzupełnień dotychczas stosowanych algorytmów obliczeń [9,11].

Do obliczenia emisyjności zastępczej użyto zależności wprowadzonych dla dwu współosiowych dysków [5]

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \Phi_{1-2}}{1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)\Phi_{1-2}^2}, \quad (3.1)$$

gdzie współczynnik konfiguracji Φ_{1-2} wyraża się wzorem [1, 6,7]

$$\Phi_{1-2} = \left[\frac{\sqrt{D^2 + h^2} - h}{D} \right]^2. \quad (3.2)$$

Radiacyjny (chwilowy) strumień ciepła określony jest zależnością

$$q_R(\tau) = \sigma_0 \varepsilon_{1,2}(\tau) \left[T_{R2}^4(\tau) - T_{R1}^4(\tau) \right]. \quad (3.3)$$

Do ilustracji wyników obliczeń stosowany jest również radiacyjny strumień ciepła uśredniony dla czasu rozwarcia t_R

$$\bar{q}_R = \frac{\int_0^{t_R} q_R(\tau) d\tau}{t_R} \quad (3.4)$$

oraz radiacyjny strumień ciepła uśredniony dla całego okresu t

$$q_{\text{rad}} = \frac{\int_0^t \bar{q}_R d\tau}{t} = \frac{\int_0^{t_R} \bar{q}_R d\tau}{t} = \frac{t_R}{t} \bar{q}_R. \quad (3.5)$$

Do obliczeń wymiany ciepła przy periodycznym styku ciał stałych zastosowano metodę różnic skończonych; użyto tu schematu jawnego Bindera-Schmidta.

Cechą charakterystyczną stanu quasi-ustalonego wymiany ciepła w periodycznie stykających się ciałach, przy ustalonych warunkach brzegowych, czasie styku i czasie rozwarcia, są prostoliniowe i niezmiennie (w czasie całego okresu i kolejnych okresów) rozkłady temperatury poza strefą ich oscylacji. W trakcie jednego okresu zmiany temperatury występują w stosunkowo płytkiej warstwie pod powierzchnią styku w granicach określonych przez rozkład temperatury w ostatnim momencie zwarcia i ostatnim momencie rozwarcia ciał. Przykładowo: przy styku periodycznym ciał ze stali 35, o okresie $t = 1$ s i czasie styku $t_s = 0,1$ s oscylacje temperatury na powierzchni styku wynoszą $2,3^{\circ}\text{C}$, a na głębokości 6 mm - $0,02^{\circ}\text{C}$, natomiast przy $t = 0,1$ s i $t_s = 0,01$ s oscylacje na powierzchni styku wynoszą $0,96^{\circ}\text{C}$, a na głębokości 0,75 mm - $0,02^{\circ}\text{C}$.

Obliczenie wielkości charakteryzujących wymianę ciepła w stanie quasi-ustalonym dla każdego przypadku (określonego konkretnymi właściwościami cieplnymi, warunkami brzegowymi, czasem styku i okresem) wymaga przeprowadzenia każdorazowo obliczeń numerycznych w paruset kolejnych okresach, niezależnie od początkowego rozkładu temperatury. Jest to warunek osiągnięcia stanu quasi - ustalonego. Do przeprowadzenia obliczeń o zadowalającej dokładności konieczne jest zastosowanie małych kroków dyskretyzacji czasu (wielkość kroku czasowego uzależniona jest od wielkości najkrótszego przedziału czasowego, to jest czasu styku lub rozwarcia) i tym samym małych kroków dyskretyzacji przestrzeni. Osiągnięcie stanu quasi-ustalonego wymaga zatem bardzo czasochłonnych obliczeń. Fakt ten ograniczył zakres tej pracy.

Obliczenia przeprowadzono dla styku stali 35 ze stalą 35 i duralu z duraliem. Dla stali 35 przyjęto $a = 11,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\lambda = 41 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; dla duralu $a = 66,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\lambda = 165 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Przyjęto średnice ciał 25 mm i maksymalne odległości rozwarcia 2,5 mm, a także 25 i 100 mm. Wartości emisyjności związane były z rodzajem materiałów oraz temperaturami powierzchni sty-

ku i wynosiły najczęściej 0,8, a także 0,6 i 0,9. Obliczenia wykonano dla okresów $t = 0,1, 0,2, 0,5$ i $1,0$ s, oraz stosunków czasu styku do okresu $t_s/t = 0,01-0,9$.

Obliczenia wykonano na mikrokomputerze PC 386. Czas obliczenia jednego przypadku, tj. pół temperatury w stanie quasi-ustalonym dla określonej wartości t i t_s/t wynosił ok. 50 min. Wykonanie wszystkich obliczeń trwało ok. 1000 h.

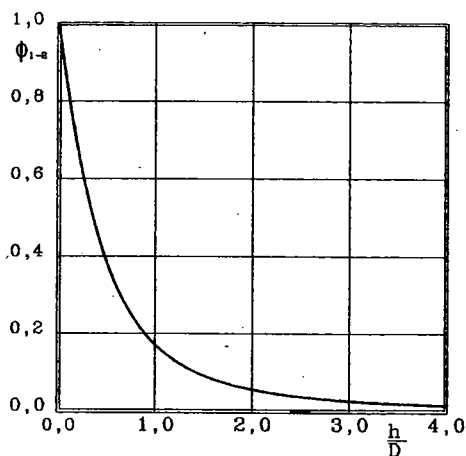
4. WYNIKI OBLICZEŃ

Zasadnicze obliczenia wymiany ciepła przy periodycznym styku z uwzględnieniem radiacji termicznej zostały poprzedzone analizą zmian współczynnika konfiguracji i emisyjności zastępczej w rozpatrywanym modelu.

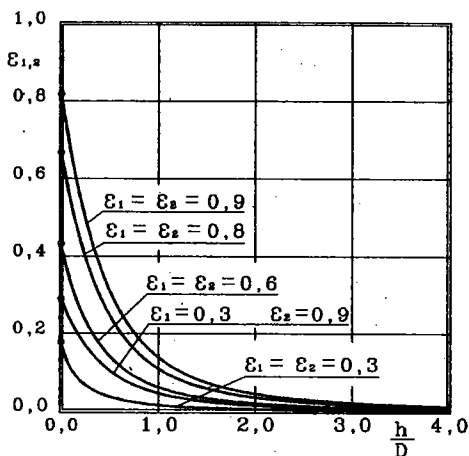
W zakresie rozwarcia do 2,5 mm, przy średnicy powierzchni styku 25 mm współczynnik konfiguracji zmienia się od 1 do 0,82 (rys.3). Należy zauważyć, że przy rozpatrywanej geometrii powierzchni wymieniających ciepło na drodze radiacji największa zmiana wartości współczynnika konfiguracji następuje w zakresie zmian h/D od 0 do 1.

Obliczenia emisyjności zastępczej przy różnych wartościach emisyjności powierzchni ciał (rys.4) wykazały, iż największe zmiany wartości $\varepsilon_{1,2}$ mają miejsce w zakresie zmian h/D od 0 do 1, przy czym zmiany te są tym znaczniejsze, im większe są wartości emisyjności ε_1 i ε_2 .

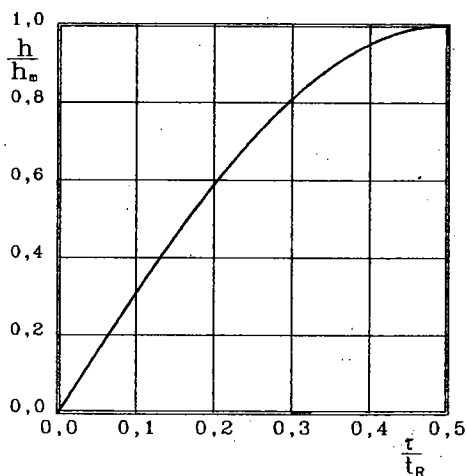
Przeprowadzone zostały również obliczenia emisyjności zastępczej dla przypadku, gdy rozpatrywane w tej pracy ciała poruszają się w czasie rozwarcia według funkcji $\sin(\pi\tau/t_R)$ w zakresie od 0 do π (rys.5). Dla tak zdefiniowanego wzajemnego ruchu ciał zmiany emisyjności zastępczej $\varepsilon_{1,2}$ w czasie rozwarcia ciał są dla maksymalnego oddalenia $h_m = 2,5$ mm stosunkowo niewielkie (rys.6); średnia wartość emisyjności zastępczej różni się od wartości ekstremalnych o 7 do 14%. Zatem przyjęcie do obliczeń modelu natychmiastowo zbliżanych i oddalanych ciał może być poprawne, nawet gdy rzeczywisty przebieg



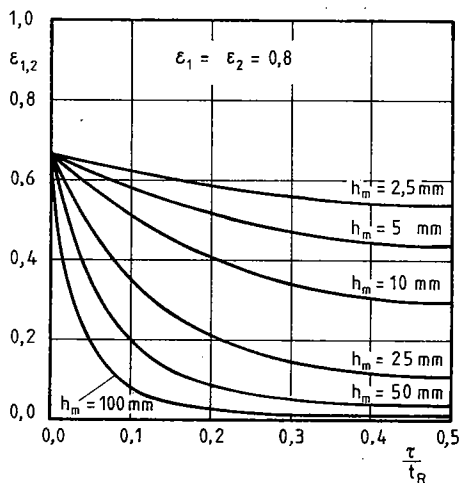
Rys.3. Zależność współczynnika konfiguracji ϕ_{1-2} od stosunku h/D dla rozpatrywanej geometrii ciał



Rys.4. Zależność emisyjności zastępczej $\epsilon_{1,2}$ od stosunku h/D przy różnych emisyjnościach powierzchni ciał dla rozpatrywanej geometrii ciał



Rys.5. Zmiana odległości powierzchni styku ciał w czasie ich rozwarcia według funkcji $h = h_m \sin(\pi \tau / t_R)$



Rys.6. Zmiana emisyjności zastępczej w czasie rozwierania ciał, przy ich oddalaniu według funkcji $h = h_m \sin(\pi \tau / t_R)$

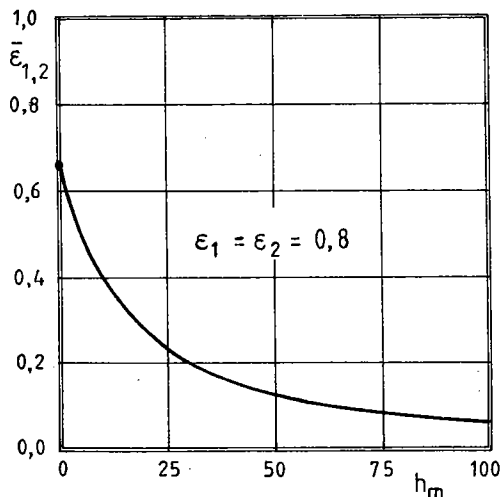
znacznie różni się od przyjętego modelu. Różnice w zmianach wartości emisyjności zastępczej są tym mniejsze, im mniejsze są maksymalne oddalenia ciał.

Na rysunku 7 przedstawiono zależność średniej wartości emisyjności zastępczej dla czasu rozwarcia od maksymalnego oddalenia ciał w przypadku modelu "sinusoidalnego".

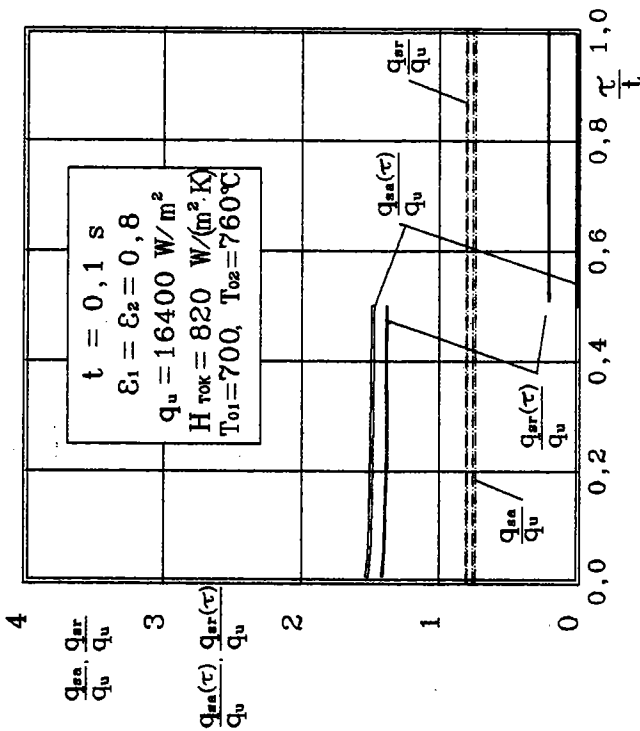
Większość obliczeń wykonano przy maksymalnym oddaleniu $h_m = 2,5 \text{ mm}$ i w zakresie temperatur $700\text{--}800^\circ\text{C}$ oraz $300\text{--}400^\circ\text{C}$.

Na rysunku 8 zilustrowano zmianę, w stosunku do strumienia q_u , chwilowych gęstości strumieni ciepła na powierzchniach styku w czasie jednego okresu, przy założeniu warunków adiabatycznych w czasie rozwarcia $q_{sa}(\tau)$ i w obecności radiacji $q_{sr}(\tau)$. Przedstawione zależności obliczone zostały dla styku periodycznego ciał wykonanych ze stali 35, przy $t = 0,1 \text{ s}$ i $t_s/t = 0,5$. Liniami kreskowymi zaznaczono gęstości strumieni ciepła q_{sa} i q_{sr} , uśrednione dla całego okresu.

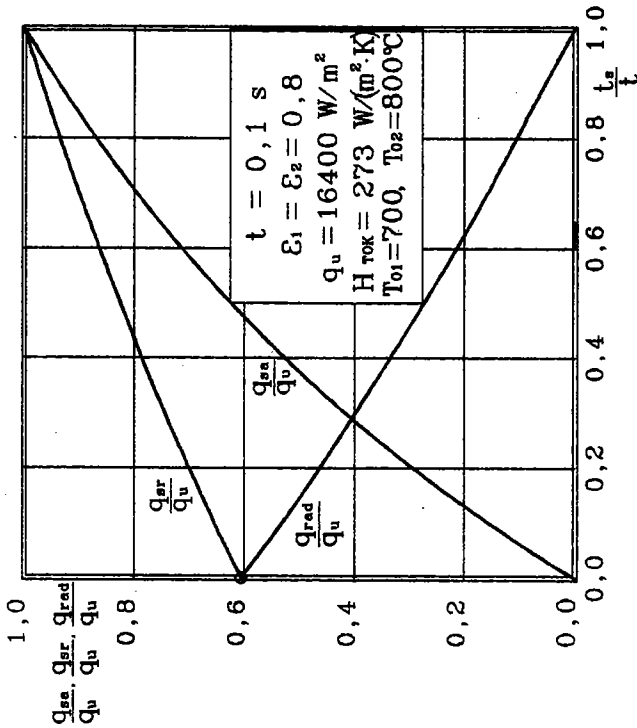
W czasie zetknięcia ($0 < \tau < t_s$) przez powierzchnie styku przepływa malejący w czasie strumień ciepła, który jest nie-raz znacznie większy od wartości strumienia q_u przekazywanego podczas trwałego zetknięcia przy tych samych temperaturach T_{01} i T_{02} oraz takim samym termicznym oporze kontaktowym. Obecność radiacji w czasie rozwarcia powoduje zmniejszenie wartości tego strumienia ($q_{sr}(\tau) < q_{sa}(\tau)$). Strumień ciepła wymieniany na drodze radiacji przy założeniu w tym przypadku natychmiastowego oddalenia ciał nieznacznie wzrasta pod-



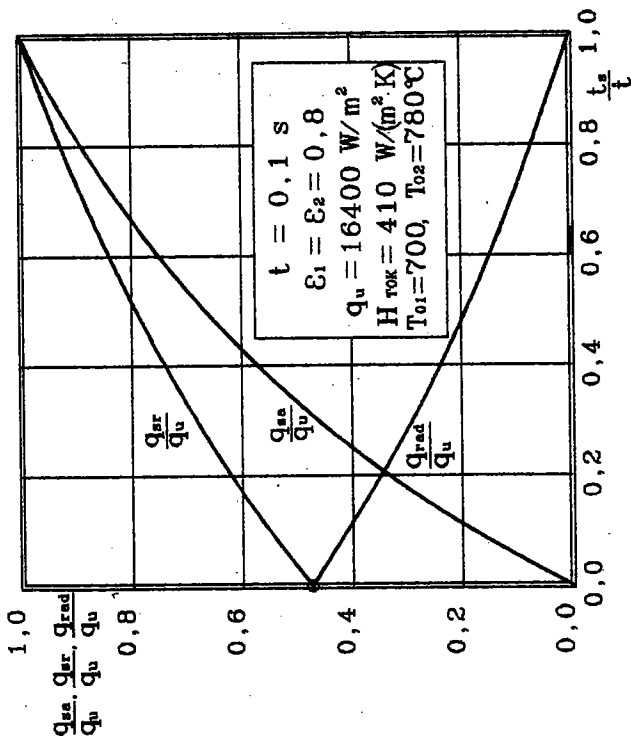
Rys.7. Średnie wartości emisyjności zastępczej w funkcji maksymalnego oddalenia ciał przy rozwieraniu według funkcji $h = h_m \sin(\pi \tau / t_R)$



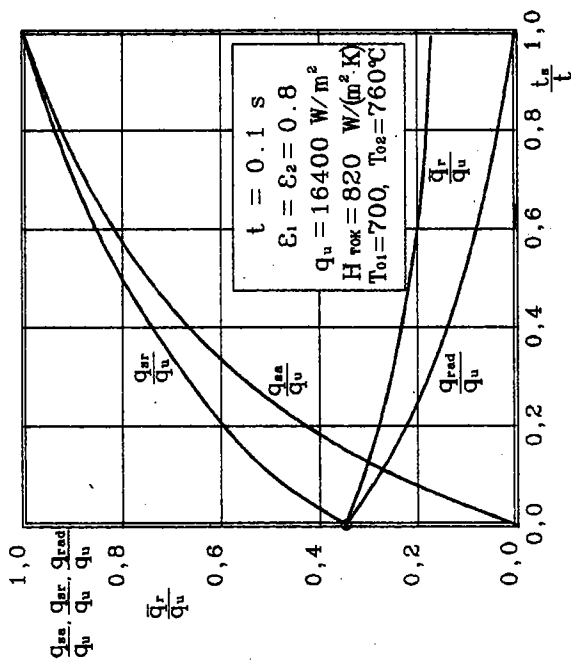
Rys.8. Względne zmiany gęstości strumieni ciepła na powierzchni styku ciał w czasie całego okresu, przy warunkach adiabatycznych w czasie rozwarcia i w obecności radiacji w czasie rozwarcia; $t = 0,1 \text{ s}$, $t_s/t = 0,5$, materiał - stal 35, natychmiastowe oddalenie ciał



Rys.9. Względne gęstości strumieni ciepła w funkcji stosunku czasu styku do okresu przy periodycznym styku ciał wykonanych ze stali 35; $t = 0,1 \text{ s}$, $h_m = 2,5 \text{ mm}$, $\epsilon_{1,2} = 0,54$



Rys.10. Względne gęstości strumienia ciepła w funkcji stosunku czasu styku do okresu przy pe-riodycznym styku ciał wykonanych ze stali 35; $t = 0,1$ s, $h_m = 2,5$ mm, $\epsilon_{1,2} = 0,54$



Rys.11. Względne gęstości strumienia ciepła w funkcji stosunku czasu styku do okresu przy pe-riodycznym styku ciał wykonanych ze stali 35; $t = 0,1$ s, $h_m = 2,5$ mm, $\epsilon_{1,2} = 0,54$

czas rozwarcia (w skali rysunku nie jest to widoczne). W niektórych przypadkach może to być funkcja malejąca w czasie.

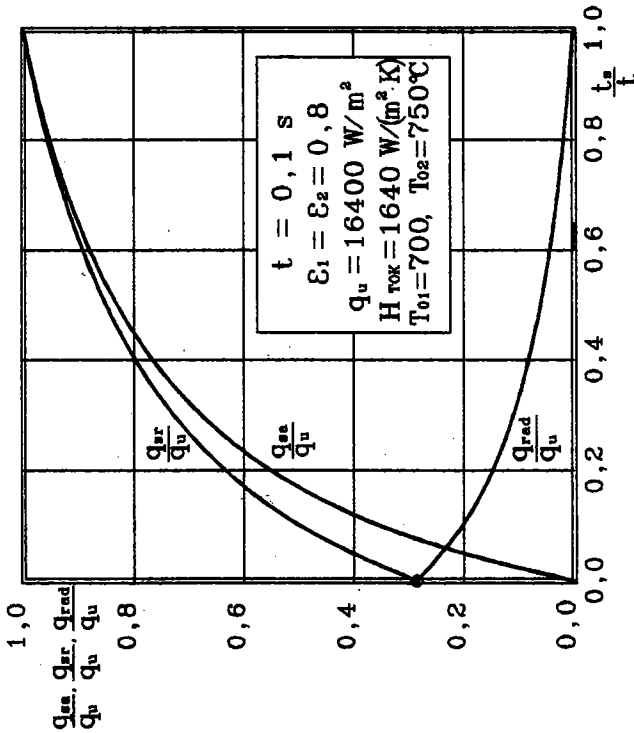
Średnia dla całego okresu gęstość strumienia ciepła przepływającego przez powierzchnie styku, przy uwzględnieniu radiacji podczas rozwarcia q_{sr} , jest większa niż analogiczna średnia przy założeniu warunków adiabatycznych podczas rozwarcia q_{sa} .

Obniżenie gęstości strumieni ciepła przepływających przez powierzchnie styku w czasie zetknięcia w wyniku istnienia radiacji podczas rozwarcia jest spowodowane zmniejszeniem różnicy temperatur na powierzchniach styku w czasie rozwarcia, a więc również w pierwszym momencie zetknięcia. Od tej różnicy temperatur zależy, jaka ilość ciepła przepływa przez powierzchnie styku w czasie zetknięcia.

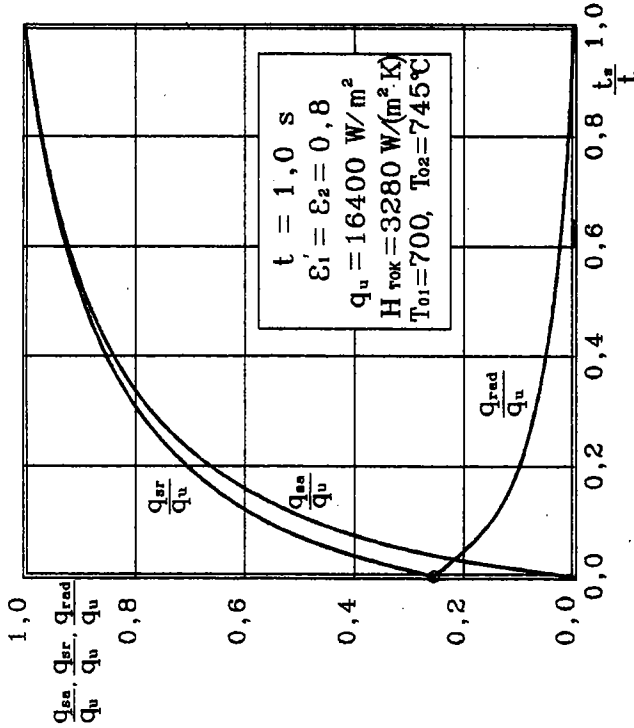
Na rysunkach 9-24 przedstawiono względne zmiany gęstości strumieni ciepła wymianianego na drodze radiacji q_{rad} (uśrednionego dla całego okresu), strumienia ciepła przy styku periodycznym przy braku radiacji q_{sa} i w obecności radiacji na powierzchniach styku q_{sr} w funkcji stosunku czasu styku do okresu t_s/t . Strumienie q_{sa} i q_{sr} są średnimi dla całego okresu strumieniami ciepła przepływającymi przez ciała. Mogą być one obliczane z prostoliniowych gradientów temperatury w głębi ciał (poza strefami oscylacji temperatury) w stanie quasi-ustalonym. Ich wartości odniesione są do gęstości strumienia ciepła q_u , jaki przepływałby przy stałym zetknięciu ciał, przy tych samych temperaturach T_{01} i T_{02} oraz tym samym termicznym oporze kontaktowym.

Gęstość strumienia ciepła q_{sa} osiąga dla $t_s/t = 0$ wartość równą zero, natomiast dla $t_s/t = 1$ wartość gęstości strumienia ciepła q_u .

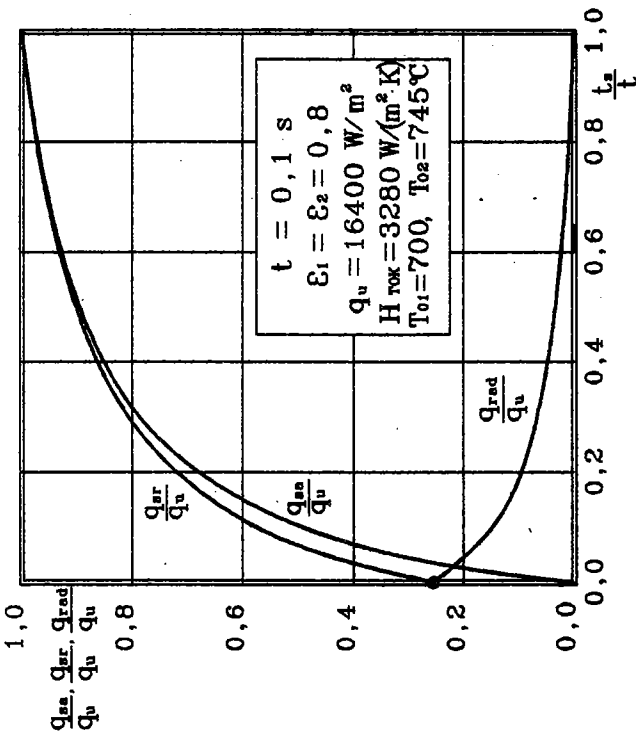
Gęstości radiacyjnych strumieni ciepła \bar{q}_r i q_{rad} osiągają dla $t_s/t = 0$ wartość wynikającą ze stanu równowagi, jaka ustala się między trwale oddalonymi dwoma ciałami, wymieniającymi ciepło wyłącznie na drodze radiacji, przy ustalonych skrajnych temperaturach T_{01} i T_{02} (rys.11). Przy zwiększaniu stosunku t_s/t gęstość radiacyjnego strumienia ciepła \bar{q}_r zmierza do wartości równej gęstości strumienia ciepła wymianianego na drodze radiacji między ciałami o temperaturach po-



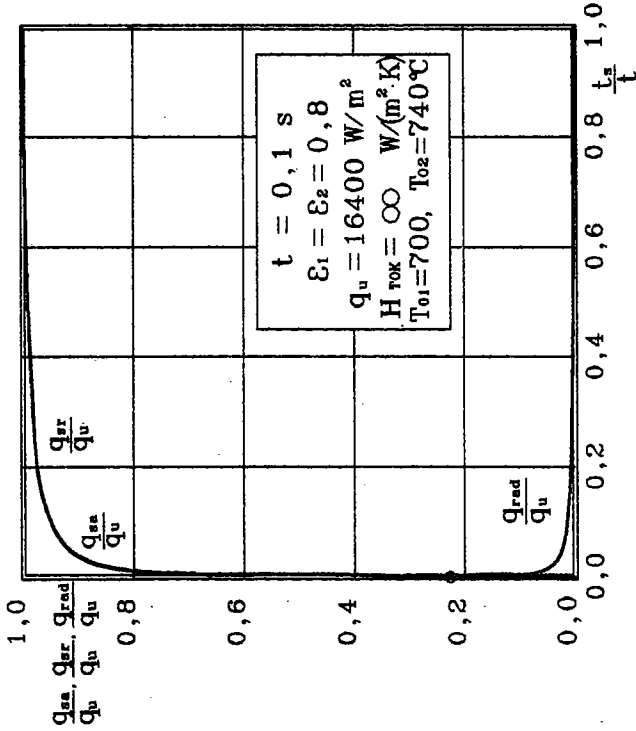
Rys.12. Względne gęstości strumienia ciepła w funkcji stosunku czasu styku do okresu przy pe-
riodycznym styku ciał wykonanych
ze stali 35; $t = 0,1 \text{ s}$, $h_m =$
 $= 2,5 \text{ mm}$, $\epsilon_{1,2} = 0,54$



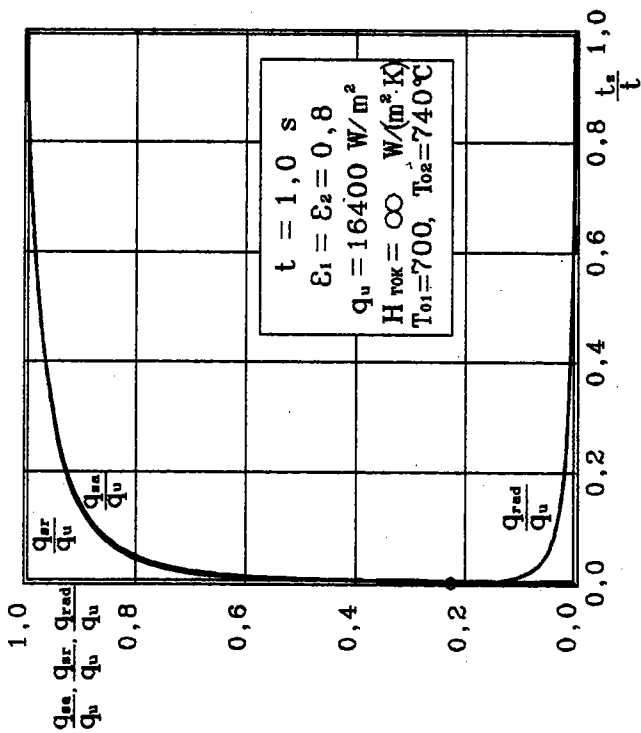
Rys.13. Względne gęstości stru-
mieni ciepła w funkcji stosunku
czasu styku do okresu przy pe-
riodycznym styku ciał wykonanych
ze stali 35; $t = 0,1 \text{ s}$, $h_m =$
 $= 2,5 \text{ mm}$, $\epsilon_{1,2} = 0,54$



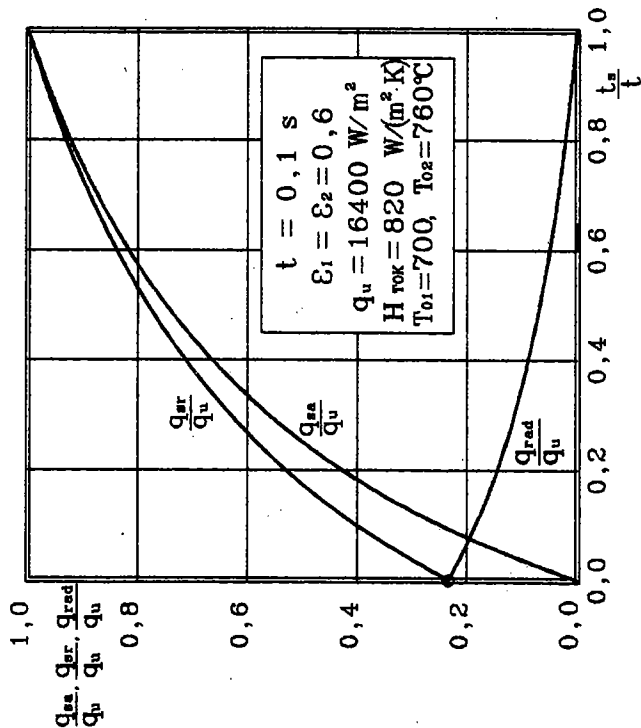
Rys.14. Względne gęstości strumienia ciepła w funkcji stosunku czasu styku do okresu przy pe-riodycznym styku ciał wykonanych ze stali 35; $t = 1,0 \text{ s}$, $h_m = 2,5 \text{ mm}$, $\epsilon_{1,2} = 0,54$



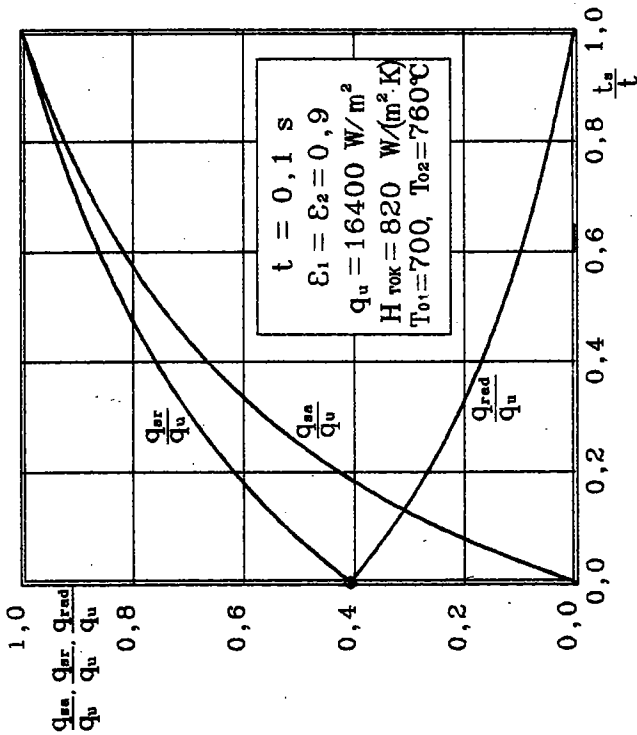
Rys.15. Względne gęstości strumienia ciepła w funkcji stosunku czasu styku do okresu przy pe-riodycznym styku ciał wykonanych ze stali 35; $t = 0,1 \text{ s}$, $h_m = 2,5 \text{ mm}$, $\epsilon_{1,2} = 0,54$



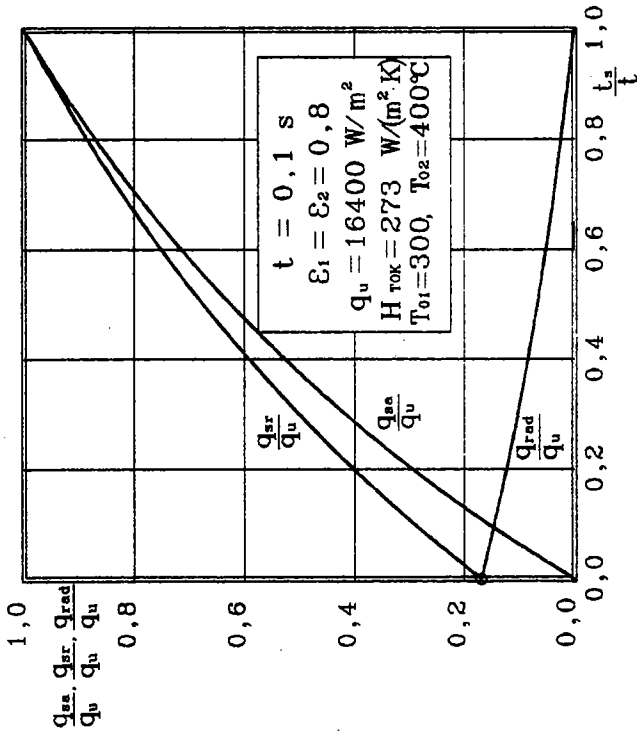
Rys. 16. Względne gęstości strumienia ciepła w funkcji stosunku czasu styku do okresu przy periodycznym styku ciał wykonanych ze stali 35; $t = 1,0 \text{ s}$, $h_m = 2,5 \text{ mm}$, $\epsilon_{1,2} = 0,54$



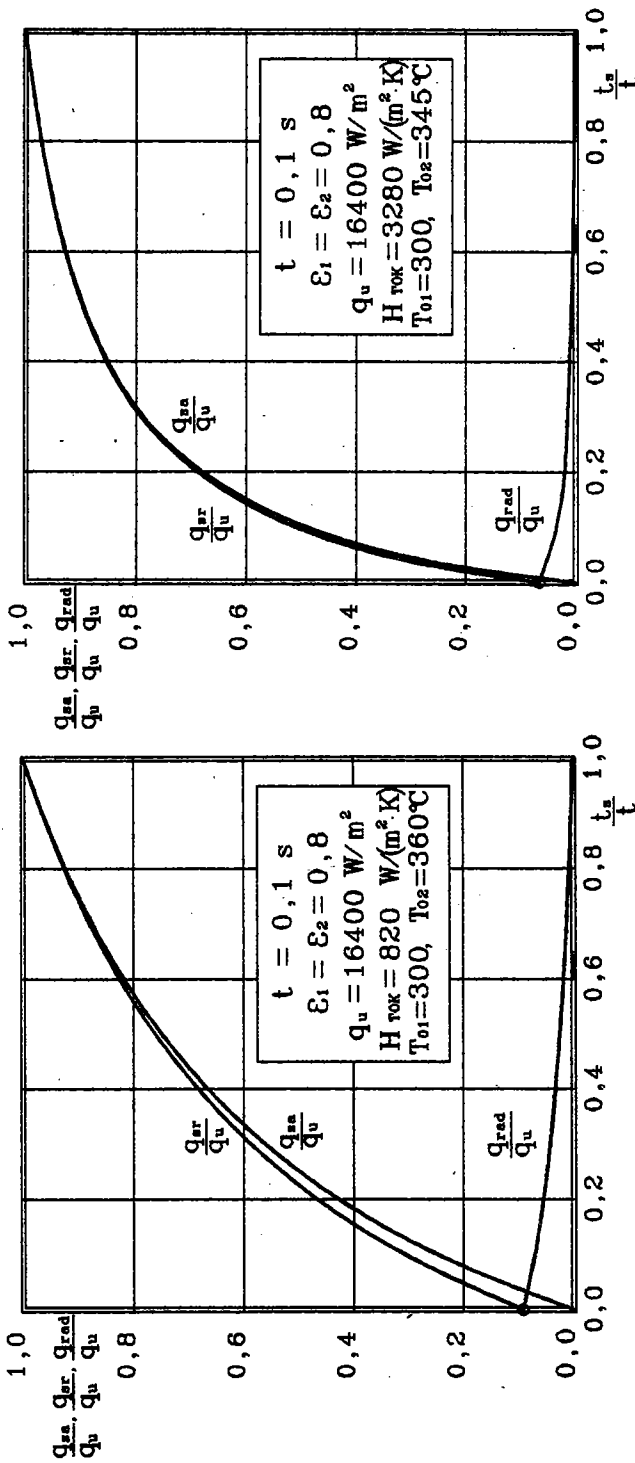
Rys. 17. Względne gęstości strumienia ciepła w funkcji stosunku czasu styku do okresu przy periodycznym styku ciał wykonanych ze stali 35; $t = 0,1 \text{ s}$, $h_m = 2,5 \text{ mm}$, $\epsilon_{1,2} = 0,33$



Rys.18. Względne gęstości strumienia ciepła w funkcji stosunku czasu styku do okresu przy pe-riodycznym styku ciał wykonanych ze stali 35; $t = 0,1 \text{ s}$, $h_m = 2,5 \text{ mm}$, $\epsilon_{1,2} = 0,67$

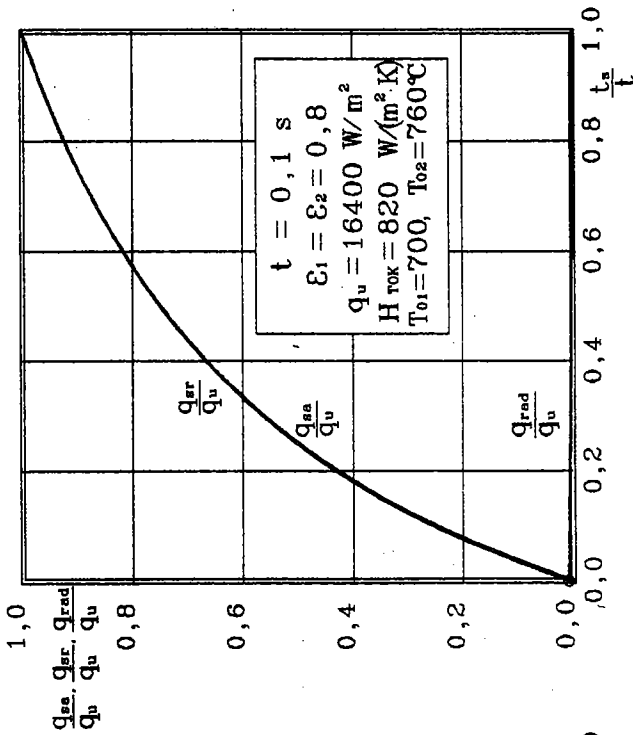


Rys.19. Względne gęstości strumienia ciepła w funkcji stosunku czasu styku do okresu przy pe-riodycznym styku ciał wykonanych ze stali 35; $t = 0,1 \text{ s}$, $h_m = 2,5 \text{ mm}$, $\epsilon_{1,2} = 0,54$

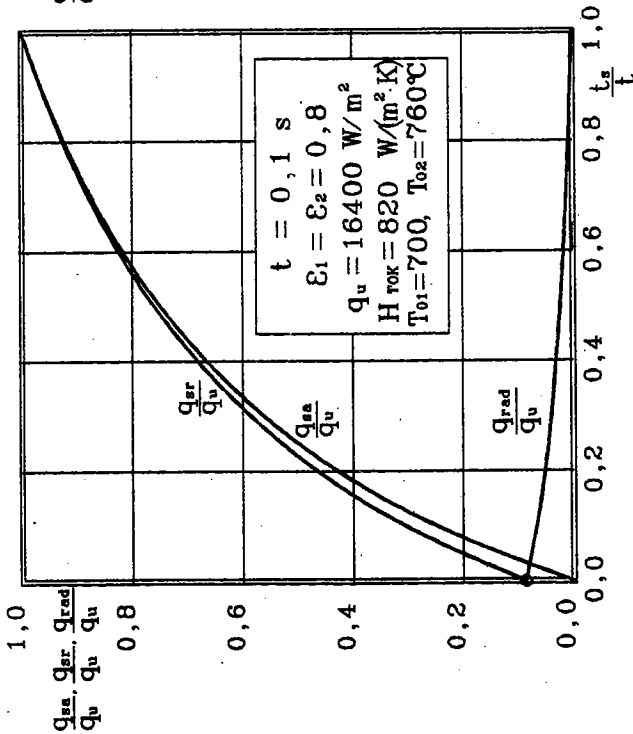


Rys.20. Względne gęstości strumieni ciepła w funkcji stosunku czasu styku do okresu przy pe-
riodycznym styku ciał wykonanych
ze stali 35; $t = 0,1 \text{ s}$, $h_m =$
 $= 2,5 \text{ mm}$, $\epsilon_{1,2} = 0,54$

Rys.21. Względne gęstości stru-
mieli ciepła w funkcji stosunku
czasu styku do okresu przy pe-
riodycznym styku ciał wykonanych
ze stali 35; $t = 0,1 \text{ s}$, $h_m =$
 $= 2,5 \text{ mm}$, $\epsilon_{1,2} = 0,54$



Rys.23. Względne gęstości strumieni ciepła w funkcji stosunku czasu styku do okresu przy pe-riodycznym styku ciał wykonanych ze stali 35; $t = 0,1 \text{ s}$, $h_m = 100 \text{ mm}$, $\epsilon_{1,2} = 0,01$



Rys.22. Względne gęstości strumieni ciepła w funkcji stosunku czasu styku do okresu przy pe-riodycznym styku ciał wykonanych ze stali 35; $t = 0,1 \text{ s}$, $h_m = 25 \text{ mm}$, $\epsilon_{1,2} = 0,11$

wierzchni styku takich, jak przy trwałym zetknięciu. Oscylacje temperatur na powierzchni (przy zwiększaniu stosunku t_s/t) są coraz mniejsze i średnie temperatury na powierzchniach są coraz bliższe temperaturom odpowiadającym trwałemu zetknięciu. Dla $t_s/t = 1$, $\bar{q}_r = 0$ i $q_{rad} = 0$, ponieważ ciała zostają wówczas trwale zetknięte.

Gęstość strumienia ciepła q_{sr} przy zmniejszaniu stosunku t_s/t do wartości równej zero dąży do wartości \bar{q}_r w tym punkcie, równej jednocześnie q_{rad} . Dla $t_s/t = 1$ gęstość strumienia ciepła q_{sr} osiąga wartość q_u (następuje trwale zetknięcie).

Na rysunkach 9-16 zilustrowano wpływ termicznego oporu kontaktowego na wymianę ciepła przy periodycznym styku ciał wykonanych ze stali 35, przy takiej samej wartości strumienia q_u , emisyjności ε_1 i ε_2 , współczynnika konfiguracji ϕ_{1-2} (maksymalne oddalenie 2,5 mm) i przy temperaturach T_{01} i T_{02} w zakresie 700-800°C. Obliczenia przeprowadzono dla wartości H_{TOK} : 273, 410, 820, 1640 i 3280 W/(m²·K), oraz dla zerowego termicznego oporu kontaktowego ($H_{TOK} = \infty$).

W każdym z wariantów przyjmowano tę samą wartość temperatury $T_{01} = 700^\circ\text{C}$, natomiast $T_{02} \leq 800^\circ\text{C}$; mniejszym termicznym oporom kontaktowym (czyli większym współczynnikiem H_{TOK}) odpowiadały mniejsze wartości temperatury T_{02} , czyli mniejsza różnica $T_{02} - T_{01}$.

Zmiany termicznego oporu kontaktowego powodują znaczne zmiany zależności q_{sa}/q_u i q_{sr}/q_u od t_s/t . W miarę zwiększania termicznego oporu kontaktowego (czyli zmniejszania H_{TOK}) rośnie różnica pomiędzy q_{sa}/q_u a q_{sr}/q_u dla danej wartości t_s/t . Różnica ta jest tym większa dla danej wartości H_{TOK} , im mniejszy jest stosunek t_s/t i osiąga oczywiście maksimum dla $t_s/t = 0$.

Na rysunkach 15 i 16 zilustrowano zależności q_{sa}/q_u , q_{sr}/q_u i q_{rad}/q_u od t_s/t dla zerowego termicznego oporu kontaktowego ($H_{TOK} = \infty$). Różnice temperatur na powierzchniach styku w czasie rozwarcia powstają w tym przypadku wyłącznie w wyniku oscylacji temperatur, spowodowanych periodycznym stykaniem i rozwieraniem ciał. Dla $t = 0,1$ s oscylacje te,

czyli różnice między T_S a T_R dla każdego z ciał i tym samym różnice między T_{R2} a T_{R1} , są niewielkie. Przykładowo: dla $t_s/t = 0,1$ $T_{R2} - T_{S2} = T_{S1} - T_{R2} = 1,36^\circ\text{C}$. Podobnie, dla $t = 1,0$ s i $t_s/t = 0,1$ $T_{R2} - T_{S2} = T_{S1} - T_{R2} = 3,38^\circ\text{C}$. Z powodu małych różnic temperatur $T_{R2} - T_{R1}$ strumień ciepła wymieniany na drodze radiacji jest nieznaczny i dlatego wartości q_{sr}/q_u nie różnią się praktycznie od q_{sa}/q_u w całym zakresie zmienności t_s/t .

Przyczyną istnienia znacznego radiacyjnego strumienia ciepła przy periodycznym styku ciał jest zatem duża wartość okresu t i mała wartość stosunku t_s/t (co powoduje duże oscylacje temperatur na powierzchni), lub duża wartość termicznego oporu kontaktowego. Obydwa czynniki mogą działać jednocześnie. Wielkość radiacji termicznej zależy oczywiście również od poziomu temperatur i wartości emisyjności wzajemnej.

Zmniejszenie różnicy między temperaturami T_{O2} i T_{O1} (które wynika ze zmniejszenia termicznego oporu kontaktowego) powoduje również zmniejszenie wartości q_{sr}/q_u i q_{rad}/q_u dla $t_s/t = 0$ (zaznaczonych na rysunkach dodatkowo kółkiem).

Porównując rysunki 9 i 13 można zauważyć, że dla mniejszego termicznego oporu kontaktowego (rys.13) stosunek q_{sa}/q_u jest większy w całym zakresie zmienności t_s/t , natomiast stosunek q_{sr}/q_u jest większy dla $t_s/t > 0,17$.

Zmniejszanie termicznego oporu kontaktowego przy istnieniu radiacji podczas rozwierania ciał powoduje zatem wzrost wymiany ciepła w znacznym zakresie t_s/t , lecz także jednocześnie zmniejszenie gęstości strumienia wymienianego ciepła q_{sr} w małym przeważnie zakresie zmian t_s/t (dla wartości bliskich zeru).

W przypadku, gdyby powyższe obliczenia zostały przeprowadzone dla stałej temperatury $T_{O2} = 800^\circ\text{C}$ i zmienianej wraz z termicznym oporem kontaktowym temperatury T_{O1} (zwiększanej przy zmniejszaniu termicznego oporu kontaktowego), to nieznacznemu zwiększeniu uległyby gęstości strumieni ciepła q_{sr} i q_{rad} . Ich wartości najbardziej zwiększyłyby się dla $t_s/t = 0$, lecz nie więcej niż o 3,4%.

Zwiększenie okresu t (łączniego czasu styku i rozwarcia) od 0,1 s do 1,0 s powoduje zmniejszenie wartości q_{sa}/q_u i

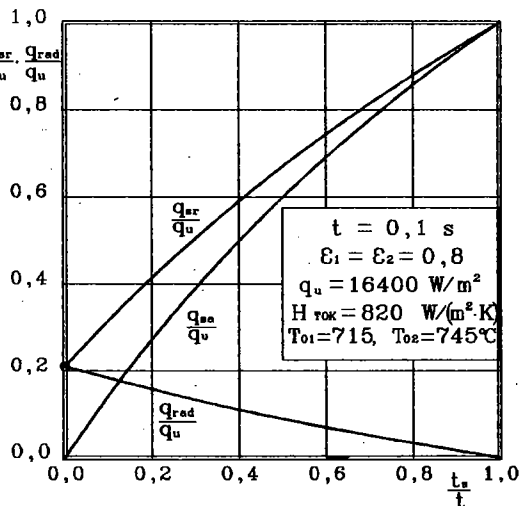
q_{sr}/q_u w całym przedziale zmienności t_s/t (poza $t_s/t = 0$ i $t_s/t = 1$, gdzie $q_{sa}/q_u = q_{sr}/q_u$), tym większe, im mniejszy jest termiczny opór kontaktowy (rys.13-16). Dla $H_{TOK} \leq \leq 3280 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ wpływ zmiany okresu na względne strumienie ciepła q_{sa}/q_u i q_{sr}/q_u jest nieznaczny.

Na rysunkach 11, 17 i 18 przedstawiono wpływ emisyjności stykających się ciał na wymianę ciepła, przy nie zmienionych pozostałych parametrach (stykają się ciała ze stali 35). Przy zwiększeniu emisyjności ϵ_1 i ϵ_2 wzrasta wartość q_{sr}/q_u tym znacznie, im mniejsza jest wartość t_s/t .

Przykładowe wyniki obliczeń wymiany ciepła dla niższego poziomu temperatury (300-400°C) i różnych wartości termicznego oporu kontaktowego przedstawione są na rys.19-21. Obniżenie temperatur T_{01} i T_{02} powoduje istotne zmniejszenie wartości q_{rad} i wpływu radiacji na całkowitą wymianę ciepła. Względne strumienie ciepła q_{sr}/q_u są znacznie mniejsze niż dla poziomu temperatur 700-800°C, szczególnie dla mniejszych wartości t_s/t .

Powyższe obliczenia wymiany ciepła wykonano przy założeniu, że maksymalne oddalenie ciał przy rozwarciu wynosiło 2,5 mm. Wpływ większego oddalenia ciał wykonanych ze stali 35 (25 i 100 mm) pokazano na rys.22 i 23 (pozostałe wartości jak dla rys.11).

Na rysunku 24 zilustrowano dla porównania wymianę ciepła przy styku $\frac{q_{sa}}{q_u}$, $\frac{q_{sr}}{q_u}$, $\frac{q_{rad}}{q_u}$ periodycznym ciał wykonanych z duralu, przyjmując te same wartości strumienia ciepła przy trwałym



Rys.24. Względne gęstości strumieni ciepła w funkcji stosunku czasu styku do okresu przy periodycznym styku ciał wykonanych z duraluminium; $t = 1,0 \text{ s}$, $h_m = 2,5 \text{ mm}$, $\epsilon_{1,2} = 0,54$

zestknięciu q_u , maksymalne oddalenia $h_m = 2,5$ mm i wartość termicznego oporu kontaktowego jak w przypadku stali 35 (rys.11). Na skutek większej dyfuzyjności cieplnej duralu gęstość strumienia ciepła q_{sa} (dla adiabatycznych warunków w czasie rozwarcia) dla tych samych wartości t_s/t osiąga mniejsze wartości niż w przypadku stali. Mniejsza różnica temperatur $T_{O2} - T_{O1}$ i mniejsze różnice $T_{R2} - T_{R1}$ przy tym samym, jak w przypadku stali strumieniu q_u powodują, iż mniejsze są wartości q_{rad}/q_u i q_{sr}/q_u . W wyniku powyższych przyczyn wartości q_{sa}/q_u , q_{rad}/q_u i q_{sr}/q_u są mniejsze w całym zakresie zmienności t_s/t (poza $t_s/t = 1$), niż dla stali.

Wykonane zostały również obliczenia wymiany ciepła przy periodycznym styku ciał stałych z uwzględnieniem radiacji dla warunków odpowiadających przeprowadzanym badaniom eksperymentalnym. Do obliczeń przyjęto zatem wartości: $t \leq 1$ s, $t_s/t = 0,1-0,9$, $H_{TOK} = 6000$ W/(m²·K), $T_{O1} = 40^\circ\text{C}$, $T_{O2} = 100^\circ\text{C}$, $\lambda = 41$ W/(m·K) i $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,4$. W tych warunkach gęstości strumienia wymienianego ciepła przy styku periodycznym q_{sr} wynoszą od 18 000 do 23 000 W/m², a na drodze radiacji termicznej przekazywana jest nieznaczna ilość ciepła; dla $t_s/t = 0,1$, $\bar{q}_{rad} = 0,0035 q_{sr}$, a dla $t_s/t = 0,9$ $\bar{q}_{rad} = 0,0004 q_{sr}$.

5. WNIOSKI

Wymiana ciepła przy periodycznym styku ciał stałych w obecności radiacji termicznej jest zagadnieniem bardzo skomplikowanym. Oprócz wymiarów, oddalenia, temperatur i emisyjności powierzchni styku, na wymianę ciepła w tych warunkach istotny wpływ mają: wartość termicznego oporu kontaktowego, czas styku i okres oraz właściwości cieplne ciał.

Przeprowadzona analiza zjawiska i wykonane obliczenia wykazały, że przy stosunkowo niskich temperaturach (40-100°C), jakie stosowano w badaniach eksperymentalnych [10], można po-

minąć wpływ radiacji termicznej na wymianę ciepła przy styku periodycznym, niezależnie od wymiarów, oddalenia i emisyjności powierzchni styku ciał.

Istotny wpływ promieniowania na wymianę ciepła przy styku periodycznym można zaobserwować praktycznie dopiero przy wyższych temperaturach powierzchni styku, np. w zakresie 300-400°C i wyższych. Z podwyższonymi temperaturami związane są na ogół również większe wartości emisyjności ciał.

Podkreślić należy, iż decydujący wpływ na wielkość radiacyjnego strumienia ciepła i w konsekwencji jego udział w całkowitej wymianie ciepła ma wartość termicznego oporu kontaktowego przy styku periodycznym ($1/H_{\text{TOK}}$). Różnica między strumieniami q_{sr} a q_{sa} (dla danej wartości H_{TOK}) jest tym większa, im mniejszy jest stosunek t_s/t . Wielkość radiacyjnego strumienia ciepła zależy przede wszystkim od różnicy temperatur T_{S1} i T_{S2} , jaka powstaje na powierzchni styku w czasie zetknięcia. Podczas rozwarcia różnica temperatur powierzchni styku $T_{\text{R2}}-T_{\text{R1}}$ ulega zwiększeniu w stosunku do $T_{\text{S2}}-T_{\text{S1}}$, tym znaczniejszemu, im większa jest dyfuzyjność ciepła na materiałów i mniejsza częstotliwość styku. W wielu przypadkach w technice dyfuzyjność materiałów i okresy styku nie są większe od przyjętych do obliczeń w tej pracy; różnica temperatur na powierzchniach styku nie wzrasta więc istotnie w czasie rozwarcia. W obliczanych przykładach temperatury T_{R1} i T_{R2} różniły się nie więcej niż o 3°C od T_{S1} i T_{S2} .

Jak wynika z przeprowadzonych rozważań i obliczeń (rys.8), istnienie radiacji termicznej podczas rozwarcia powoduje zmniejszenie strumienia ciepła przekazywanego podczas zetknięcia (różnice temperatur na powierzchniach styku w ostatnich momentach rozwarcia są wówczas mniejsze). Jednakże średnia dla całego okresu wartość strumienia ciepła przekazywanego między ciałami jest oczywiście większa niż w przypadku adiabatycznych warunków na powierzchniach styku w czasie rozwarcia.

Obecność radiacji termicznej ma nieco większy wpływ na całkowitą wymianę ciepła w przypadku mniejszych częstotliwości styku, czyli większych okresów, przy identycznych pozostałych parametrach.

Stosunkowo nieduży wpływ na efektywną wymianę ciepła przy styku periodycznym ciał w rozważanym układzie (mimo pewnego zwiększania radiacyjnego strumienia ciepła) mają zmiany wartości emisyjności ciał. Zakres możliwych w danych temperaturach zmian wartości emisyjności (np. w wyniku odpowiedniej obróbki) jest, w przeciwieństwie np. do termicznego oporu kontaktowego, ograniczony. Dlatego również wpływ emisyjności na radiacyjny strumień ciepła i całkowitą wymianę ciepła ma określone granice; jest największy dla wartości t_s/t bliskich zeru.

Istotny wpływ na radiacyjną wymianę ciepła i tym samym na wymianę ciepła przy periodycznym styku w obecności radiacji mają wymiary i odległość powierzchni styku. W badanym układzie ciał rozwieranie powierzchni styku na odległość porównywalną z ich średnicą znacznie osłabiało wpływ promieniowania, a przy periodycznym rozwieraniu na odległość równą czterem średnicom wpływ radiacji był całkowicie pomijalny, mimo znacznego poziomu temperatur (700-800°C).

Stwierdzono również istotny wpływ właściwości cieplnych stykanych ciał na wymianę ciepła w obecności radiacji termicznej. Zwiększenie dyfuzyjności (i przewodności) cieplnej przy pozostałych parametrach nie zmienionych powoduje, że przy styku periodycznym, niezależnie czy w obecności, czy bez promieniowania, wymieniana jest mniejsza ilość ciepła.

Charakterystyczną cechą wymiany ciepła przy periodycznym styku ciał w obecności radiacji jest wzrost gęstości strumienia ciepła q_{sr} w porównaniu z gęstością strumienia ciepła w warunkach adiabatycznych q_{sa} w miarę zmniejszania stosunku czasu styku do okresu t_s/t , czyli przy zwiększaniu czasów rozwarcia.

Przedstawione wyniki obliczeń mogą stanowić materiał studialny, na podstawie którego dałoby się być może w pewnych przypadkach rozwiązać zagadnienia wymiany ciepła wprowadzając modele (nawet przybliżone) nie wymagające wykonywania żmudnych obliczeń numerycznych.

BIBLIOGRAFIA

1. W.Gogół: Wymiana ciepła. Tablice i wykresy. WFW, Warszawa 1984.
2. W.Gogół, T.Wiśniewski: Opory termiczne w wymianie ciepła przy okresowym styku ciał stałych. XIV Zjazd Termodynamików, Kraków 1990.
3. J.R.Howard, A.E.Sutton: An Analogue Study of Heat Transfer Through Periodically Contacting Surfaces. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.13, 1970, pp.173-183.
4. J.R.Howard, A.E.Sutton: The Effect of Thermal Contact Resistance on Heat Transfer Between Periodically Contacting Surfaces. *J. Heat Transfer*, Vol.95C(3), 1973, pp.411-412.
5. E.Kostowski: Przepływ ciepła. DWPS, Gliwice 1986.
6. M.N.Ozisik: Radiative Transfer and Interactions with Conduction and Convection. John Wiley & Sons, New York 1973.
7. R.Siegel, J.R.Howell: Thermal Radiation Heat Transfer. McGraw-Hill Book Company, New York 1972.
8. B.Vick, M.N.Ozisik: Quasi-Steady-State Temperature Distribution in Periodically Contacting Finite Regions. *J. Heat Transfer*, Vol.103, 1981, pp.739-744.
9. T.Wiśniewski: Podstawowe problemy związane z przewodzeniem ciepła między okresowo stykającymi się ciałami stałymi. VI Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy, Jabłonna 1986.
10. T.Wiśniewski: Metoda badań eksperymentalnych wymiany ciepła przy okresowym styku ciał stałych. VII Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy, Jadwisin 1989.
11. T.Wiśniewski: Analiza możliwości uogólnienia otrzymanych wyników badań wymiany ciepła między ciałami stałymi przy okresowych warunkach styku. Centralny Program Badań Podstawowych 02.22.1990 r. ITCSS Politechniki Poznańskiej.

THE EFFECT OF THERMAL RADIATION ON HEAT CONDUCTION PROCESSES
IN THE SYSTEM OF TWO PERIODICALLY CONTACTING SOLIDS

S u m m a r y

Heat transfer across periodically contacting end faces of two cylinders including thermal radiation is discussed. The effects of the thermal properties, the emissivities of the bodies, the thermal contact resistance, the level of temperatures and the mutual configuration of the two bodies on the heat transfer are illustrated with the results of numerical calculations.

ВЛИЯНИЕ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛООБМЕНА НА ПРОЦЕСС ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ КОНТАКТЕ ДВУХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ
ОПРЕДЕЛЕННОЙ ФОРМЫ

Р е з ю м е

В работе изучен лучистый теплообмен между торцами двух цилиндрических периодически соприкасающихся образцов. Представлены результаты численных расчетов, показывающие влияние тепловых свойств, эмиссионной способности, взаимного пространственного расположения тел, а также термического сопротивления контакта и уровня температуры тел на процесс теплообмена.