

Prof. dr hab. inż. Piotr Furmański  
Instytut Techniki Ciepłej  
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa  
Politechnika Warszawska  
ul. Nowowiejska 25  
Tel: 022-234-5276  
Fax: 825-05-65  
E-mail: pfurm@itc.pw.edu.pl

**Opinia o rozprawie doktorskiej  
mgr inż. Przemysława Sadowskiego pt.**

**”Modelowanie przepływu ciepła przez powierzchnię kontaktu ciał  
chropowatych w procesach przeróbki plastycznej”**

**1. Omówienie rozprawy doktorskiej**

Rozprawa doktorska mgr inż. Przemysława Sadowskiego dotyczy modelowania przepływu ciepła przez chropowate powierzchnie kontaktu w przypadku gdy są one stacjonarne względem siebie oraz w przypadku ich ruchu względnego dla dużych zmian pola powierzchni rzeczywistego styku ciał charakterystycznych dla procesów obróbki plastycznej oraz zastosowania otrzymanych zależności na współczynnik przewodności kontaktowej (thermal contact conductance) do modelowania procesu redukcji grubości blachy, tzw. testu SRT, którego opis i wyniki pomiarów opisano w jednym z rozdziałów. Rozprawa zawiera 140 stron, 99 rysunków, 10 tablic, 120 pozycje bibliograficzne i składa się z dziewięciu rozdziałów. Ponadto do pracy dołączono obszerny dodatek dotyczący wpływu tarcia na spłaszczanie nierówności powierzchni.

Układ rozprawy jest klasyczny. We wprowadzeniu (rozdział 1) przedstawiono motywację uzasadniającą celowość podjęcia pracy w tematyce rozprawy. Zawiera on również omówienie celu, zakresu pracy, przyjętych podstawowych założeń oraz układu rozprawy. Jako zasadniczy cel pracy doktorant przyjął opracowanie modelu przepływu ciepła między stykającymi się ciałami, który mógłby zostać wykorzystany w symulacjach numerycznych procesów obróbki plastycznej.

W rozdziale drugim Autor dokonuje krótkiego przeglądu literatury dotyczącego sposobów wyznaczania rzeczywistego pola powierzchni kontaktu ciał pod wpływem nacisków i tarcia zarówno dla małej wielkości tego pola w stosunku do nominalnej powierzchni styku jak i w przypadku gdy relacja tego pola do nominalnego jest duża jak to ma miejsce w procesach przeróbki plastycznej. Omawia tutaj szczegółowo dwa sposoby wyznaczania pola rzeczywistego kontaktu ciał – jeden geometryczny oparty o przecinanie wynikowej powierzchni chropowatej płaszczyzną równoległą do płaszczyzny średniej - analogiczny do wyznaczania krzywej nośności; drugi sposób polegający na wykorzystaniu metody elementów skończonych oraz modelu sprężystego lub sprężysto-plastycznego



deformacji do analizy kontaktu sztywnego, gładkiego i nieodkształcalnego ciała z chropowatą powierzchnią drugiego ciała prowadzącego do spłaszczenia nierówności.

Trzeci rozdział poświęcony jest krytycznemu przeglądowi literatury dotyczącej przepływu ciepła przez powierzchnię styku ciał, czynników wpływających na ten przepływ, definicji kontaktowego oporu cieplnego oraz efektywnego współczynnika przewodności kontaktowej. Doktorant krótko przedstawia tu metody eksperymentalnego i teoretycznego wyznaczania efektywnej przewodności kontaktowej oraz założenia i ograniczenia dotychczasowych modeli teoretycznych bazujących na założeniu niewielkiej wartości stosunku rzeczywistego pola kontaktu do pola nominalnego.

W rozdziale czwartym Autor rozprawy formułuje własny mikroskopowy problem brzegowy, który bazuje na założeniu występowania powtarzalnego, powierzchniowego elementu reprezentatywnego dla chropowatej powierzchni kontaktu ciał oraz lokalnej zmiany lokalnej wartości współczynnika przewodności kontaktowej. Problem ten rozwiązuje metodą elementu skończonego po wcześniejszym wyznaczeniu rozkładu rzeczywistego styku opierając się na założeniu występowania spłaszczania lub ścinania nierówności i wykorzystaniu znanego profilu nierówności. Rozwiązanie problemu mikroskopowego na rozkład temperatury w pobliżu stykających się powierzchni służy mu z kolei do wyznaczenia efektywnego, makroskopowego współczynnika przewodności kontaktowej. Swoje wyniki numeryczne aproksymuje następnie przy pomocy funkcji analitycznej zawierającej dwa dopasowywane parametry  $b$  i  $\beta$ . Weryfikację zaproponowanego modelu na efektywną, powierzchniową przewodność cieplną doktorant przeprowadził wykorzystując wyniki pomiarów cytowanych przez Bahraniego oraz Clausinga i Chao dla małego, rzeczywistego pola powierzchni styku. Porównał również wyniki ze swojego modelu z przewidywaniami wybranych modeli cytowanych w literaturze dla małego (Greenwood & Williamson, Cooper et al., Yovanovich, Mikic & Rohsenow) i dużego (Wilsona et al. – model WSL) pola rzeczywistego styku powierzchni. Wykazał tutaj, że jego model daje jakościowo poprawne wyniki, zgodne z innymi modelami, oraz, że przy właściwym doborze parametrów  $b$  i  $\beta$ , możliwe jest uzyskanie zgodności wyników przedstawionego modelu z wynikami pomiarów.

Wpływ wybranych czynników, zarówno związanych z modelem matematycznym i numerycznym (całkowanie numeryczne, warunki brzegowe, wielkość pola powierzchni elementu reprezentatywnego) jak i związanych z charakterystyką geometryczną powierzchni chropowatej oraz właściwościami kontaktujących się ciał (rozkład obszarów rzeczywistego styku, kąt pochylenia nierówności, przewodności cieplne ciał, rodzaj deformacji chropowatości, względny ruch ciał) jest przedmiotem badań opisanych w rozdziale piątym.

W rozdziale szóstym autor rozprawy bliżej analizuje wpływ charakterystyki geometrycznej chropowatości na wyniki przewidywań i stwierdza, że możliwe jest związanie jednego z dopasowywanych parametrów modelu z tzw. długością charakterystyczną dla chropowatości powierzchni. Następnie przedstawia wyniki korelacji wspomnianej długości charakterystycznej ze średnim odstępem profilu chropowatości opisującym cechy wzdłużne profilu. Pozwala to uzyskać dobrą zgodność wyników symulacji efektywnego współczynnika przewodności kontaktowej, otrzymanej przy pomocy MES, ze wzorem aproksymującym te wyniki przedstawionym w rozdziale czwartym.

Rozdział siódmy rozprawy poświęcony jest opisowi stanowiska pomiarowego oraz wyników pomiarów zmian siły przeciągania blachy oraz zmian temperatury w wybranych punktach narzędzia. Stanowisko to służy sprawdzaniu efektywności smarowania podczas redukcji grubości blachy (SRT) i stosowaniu modyfikacji powierzchni blachy przy użyciu smaru polimerowego. Badania na wspomnianym stanowisku, w których Doktorant osobiście uczestniczył, były prowadzone w ramach europejskiego projektu ENLUB.

W rozdziale ósmym kandydat przedstawia uproszczony, trójwymiarowy model matematyczny stanowiska pomiarowego umożliwiający wyznaczenie zmian temperatury narzędzia podczas procesu redukcji grubości blachy nie uwzględniający w pełni sprzężeń między oddziaływaniami cieplnymi a deformacją plastyczną materiału a jedynie



uwzględniający generację ciepła tymi deformacjami spowodowaną. W opracowanym modelu autor wykorzystuje wcześniej przedstawioną, własną zależność na efektywny współczynnik przewodności kontaktowej. Celem symulacji numerycznej przeprowadzonej przy pomocy wspomnianego modelu stanowiska jest szybkie przewidywanie rozkładu temperatury w narzędziu oraz identyfikacji nieznanymi parametrów tego modelu poprzez porównanie jego wyników z wynikami pomiaru. Wyniki symulacji opartych o zaproponowany model porównano ze znacznie kosztownymi, pod względem obliczeniowym, wynikami pełnej analizy termomechanicznej opracowanej w ramach projektu ENLUB. Porównanie jakościowe jak ilościowe rozkładu temperatury wskazuje na poprawność wyników i celowość stosowania rozwiązania uproszczonego.

Rozprawa doktorska mgr inż. Przemysława Sadowskiego kończy się rozdziałem dziewiątym, w którym podsumowano zasadnicze wyniki oraz wskazano dalszy kierunek pracy zarówno w zakresie modelowania przepływu ciepła przez powierzchnię kontaktu dwóch materiałów jak i bardziej dokładnego modelowania procesu SRT.

## 2. Uwagi natury merytorycznej

Podczas zapoznawania się z rozprawą nasunęło mi się kilka uwag natury merytorycznej.

1. W rozdziale 5.3 badano wpływ wyboru obszaru reprezentatywnego na wartość wyznaczanego współczynnika przewodności kontaktowej poprzez zwiększanie pola analizowanej powierzchni styku oraz umieszczanie go w różnych miejscach powierzchni kontaktu. Czy jest możliwe podanie kryterium w jaki sposób powinien być dobierany ten reprezentatywny, powtarzalny obszar tak aby wyniki analizy termicznej były wystarczająco dokładne?
2. W oparciu o jaką metodę sprawdzane jest podobieństwo obszarów rzeczywistego styku powierzchni ciał dla geometrycznego ścinania nierówności i otrzymanego przy spłaszczaniu sprężysto-plastycznym materiału? Patrz str.20, wiersz 1 głównego tekstu.
3. Wielkość  $h_{eff}/h_{loc}$  jest zależna nie tylko od wartości  $\alpha$  ale również od stosunku przewodności cieplnych stykających się ciał i od sposobu rozłożenia rzeczywistych miejsc styku? Jak wielkości te uwzględniane są w wzorze (4.14)?
4. Liczba przyjętych elementów powierzchniowych na powierzchni styku istotnie wpływa na  $h_{eff}/h_{loc}$  jak pokazano na rys.5.5. Jaką liczbę elementów powierzchniowych rozłożonych na powierzchni styku przyjmowano w obliczeniach?
5. Skąd wynika warunek (5.2)?
6. Jaki jest rozrzut (dokładność) aproksymacji długości charakterystycznej  $l$  wzorem (6.6) a jaki wzorem (6.9)?
7. Dlaczego wyniki obliczeń uproszczonych porównywano jedynie z przewidywaniami modelu termomechanicznego dla początkowej fazy procesu?
8. W wyrażeniu (8.16) występuje współczynnik rozdziału ciepła generowanego na skutek tarcia. Wielkość ta nie zależy jedynie od współczynników przewodzenia ciepła kontaktujących się ciał ale również od mikrogeometrii kontaktu i względnej prędkości przemieszczania się powierzchni styku. Powinno to być odpowiednio skomentowane w tekście rozprawy.
9. Nie jest jasne czy w symulacji procesu SRT używano zależności na  $h_{eff}$  uwzględniającej wpływ ruchu powierzchni styku i czy był używany wzór (4.14).
10. Jakim zjawiskiem jest spowodowany spadek temperatury punktu P2 na rys.8.11? Jak wyjaśnić dobrą zgodność temperatury przewidywanej z pomiarem dla punktu P3 a gorsza dla pozostałych? Patrz rys.8.13.



### 3. Uwagi dotyczące formy redakcyjnej rozprawy

Praca napisana jest w sposób przejrzysty a jej układ jest poprawny. Przydałoby się oddzielne zestawienie wszystkich symboli występujących w pracy wraz z podaniem ich definicji podobnie jak definicji miar chropowatości powierzchni używanych w pracy. Brak zestawu symboli znacznie utrudnia zrozumienie rozprawy. W wielu miejscach pracy brak jest odpowiednich cytowań, np. wzory (3.25), (3.27), (3.28), (8.17), Tabela 8.1 oraz wzory na stronie 106. W pracy występuje również pewna liczba błędów redakcyjnych oraz niedomówień. Należą do nich:

- str.11, wiersz 17 i 20 od góry: Jeśli powierzchnie są przyjmowane za izotropowe to obszary styku nie mogą być elipsami najwyżej jeśli rozłożone są chaotycznie, pod względem swej orientacji w przestrzeni.
- str.15, wiersz 9 od góry: Na czym polega „...spłaszczenie pojedynczej nierówności metodą elementów skończonych”? Również na stronie 18, wiersz 8 od góry.
- str.16, wiersz 9 od dołu: „Parametr  $r$  oznacza aktualną odległość powierzchni od płaszczyzny.” Jakiej?
- str.17, Tabela 2.1: Jak zdefiniowane są wielkości występujące w podpisie pod Tabelą 2.1?
- str.18, wiersz 8 wiersz od dołu: Na czym polega „reprezentatywność obszaru ze względu na  $\alpha$ ” i ze względu na „przepływ ciepła”? Jak można wielkość tego obszaru wyznaczyć?
- str.20, wiersz 1 głównego tekstu: W oparciu o jaką metodę sprawdzane jest podobieństwo obszarów rzeczywistego styku powierzchni ciał dla geometrycznego ścinania nierówności i otrzymanego przy spłaszczaniu sprężysto-plastycznym materiału?
- str.20, wiersz 13 od dołu: Na czym polega „metoda linii poślizgu”, wyniki zastosowania której pokazano na rys.2.6b?
- str.23, 6 wiersz od dołu: Brak wyjaśnienia wielkości  $R_a$ .
- str.29, wiersz 2 od góry: Nie wszystkie założenia prowadzące od równań (3.1), (3.2) do równania (3.3) zostały tu wymienione, na przykład, jednorodność i izotropowość materiału stykających się ciał.
- str.30, wzór (3.12): Bezwymiarowy czas nazywany jest często liczbą Fouriera.
- str.30, wiersz 4 od góry: Odnośnik 2) nie obejmuje wszystkich przypadków przyjmowania temperatury cieczy we wzorze (3.9)
- str.41, wiersz 17 od dołu: Jak jest zdefiniowany wymiar charakterystyczny chropowatości?
- str.42, wiersz pod wzorem (4.1): Podana definicja nie jest zrozumiała.
- str.45: Wartość  $H$  jest przede wszystkim zależna od relacji między polem styku pojedynczego miejsca kontaktu a wielkością pola nominalnej powierzchni styku. Dlaczego sugerowano, że  $H$  powinno być równe  $L$  a ostatecznie przyjęto, że  $H=2L$ ?
- str.53, 15 wiersz od dołu: Co oznacza symbol  $\sigma$ ?
- str.54, wiersz 2 od dołu: Co to jest nierówność klinowa?
- str. 55, wiersz 2 podsumowania: Na jakiej podstawie przyjęto „prawo przewodzenia przez obszary rzeczywistego styku”?
- str.61, wiersz 18 wiersz od dołu: Co jest rozumiane przez „perioodykę”? Przyjęcie warunków izolacji cieplnej nie jest tożsame z założeniem periodyczności.
- str.62, wzór (5.4): Jeśli problem jest jednowymiarowy nie ma sensu przedstawiać ogólnej, trójwymiarowej wersji operatorów.



- str.62, zdanie pod wzorem (5.5): Powinno być „liczbę Pecleta” zamiast „liczbę Peclet”.
- str.72: Rysunek 5.18 i fragment tekstu dotyczącego sprawdzenia poprawności implementacji wymiany ciepła przez styk w przypadku względnego ruchu kontaktujących się powierzchni jest niezrozumiały.
- str.104, wiersz 1 pod Tabela 8.1: Na czym polega „uproszczenie geometrii narzędzia z ograniczeniem do dwóch wymiarów”? Patrz rys.8.2.
- str.105, 2 wiersz pod rys.8.2: Jak jest zdefiniowana wielkość  $R$ ?
- str. 106: Od czego zależy dobór parametru  $\chi$  we wzorze (8.6) oraz jak dobierano parametr  $m$ ?
- str.107, wzór (8.16): Na jakiej podstawie przyjmowano ten warunek?
- str.108, 8 wiersz od dołu: Jakie stopnie swobody ograniczają obliczenia termomechaniczne do początkowej fazy procesu?
- str.124, wzór (A.2): Brak podanych definicji  $\sigma_y$  i  $d_0$ .
- str.125: Brak definicji symboli  $t$  i  $\partial V_s$ .

## WNIOSEK KOŃCOWY

Recenzowana rozprawa doktorska podejmuje tematykę wymiany ciepła poprzez powierzchnie styku kontaktujących się ciał. Tego typu oddziaływania występują w przypadku wielu współpracujących ze sobą urządzeń, między elementami ich konstrukcji oraz w wielu procesach technologicznych. Za największe osiągnięcie Doktoranta uważam zaproponowanie metody pozwalającej na wyznaczenie efektywnego kontaktowego współczynnika przewodzenia ciepła w pełnym zakresie zmian pola rzeczywistej powierzchni kontaktu istotnej dla procesów obróbki plastycznej materiałów oraz wzoru uproszczonego (4.14) pozwalającego na jego szybkie przewidywanie tego współczynnika dla nieruchomych ciał pozostających w kontakcie. Cenne wydaje się także zaproponowanie korelacji między długością charakterystyczną występującą w tym wzorze a mierzalnym średnim odstępem profilu chropowatości.

Oceniając rozprawę doktorską mgr inż. Przemysława Sadowskiego stwierdzam, że spełnia one wymagania określone w “Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 r. W mojej opinii Kandydat zasługuje zatem na nadanie mu stopnia naukowego doktora nauk technicznych. W związku z tym **wnioskuję o dopuszczenie rozprawy mgr inż. Przemysława Sadowskiego do publicznej obrony.**