

dr hab. Stanisław Kucharski
Pracownia Warstwy Wierzchniej
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

OCENA
rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława Sadowskiego
„Modelowanie przepływu ciepła przez powierzchnię kontaktu ciał chropowatych w
procesach przeróbki plastycznej”

Opracowana na zlecenie Rady Naukowej
Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN

1. Zakres i cel rozprawy

Celem rozprawy było opracowanie modelu procesu przepływu ciepła między pozostającymi w kontakcie ciałami chropowatymi. Zakres działania modelu powinien umożliwić zastosowanie go do symulacji procesów obróbki plastycznej, zatem w analizach uwzględniono takie zjawiska jak sprężysto plastyczne zgniatanie nierówności, wzajemny ruch kontaktujących się powierzchni, tarcie. Praca składa się z dziesięciu rozdziałów (łącznie z Dodatkiem A) i wykazu literatury zawierającego 120 pozycji.

W pierwszym wstępnym rozdziale autor podaje motywacje podjęcia tematyki, określa cel i zakres pracy oraz przedstawia krótkie omówienie zakresu pracy. W rozdziale drugim omówione są modele kontaktu mechanicznego powierzchni chropowatych, ze szczególnym uwzględnieniem zależności nominalnego ciśnienia i rzeczywistej powierzchni kontaktu, która jest jednym z podstawowych parametrów w modelach kontaktowego oporu cieplnego. Uwzględniono wpływ tarcia i makroskopowej deformacji materiału, które występują w procesach przeróbki plastycznej. Zaproponowano metodę wyznaczania rzeczywistej powierzchni kontaktu dla obliczeń cieplnych. Rozdział trzeci został poświęcony problemom przepływu ciepła ze szczególnym uwzględnieniem kontaktu ciał chropowatych. Przedstawiono podstawowe równania tego zagadnienia, zdefiniowano kontaktowy opór cieplny. Omówiono prace dotyczące doświadczalnego wyznaczania tego parametru oraz wybrane modele przepływu ciepła na kontakcie powierzchni chropowatych. W rozdziale czwartym zaproponowano dwuskalowy model przepływu ciepła przez powierzchnię kontaktu ciał chropowatych. Sformułowano makroskopowy problem brzegowy wprowadzając pojęcie komórki periodycznej, niejednorodny rozkład kontaktowego oporu cieplnego wynikający z rozkładu mikroobszarów rzeczywistego styku i lokalny współczynnik przewodzenia ciepła w tych obszarach. Rozwiązując problem przy pomocy MES wyznaczono makroskopowy, efektywny współczynnik przewodzenia ciepła. Znalaziono funkcję analityczną, która aproksymuje wyniki numeryczne. Przedstawia ona zależność makroskopowego, kontaktowego współczynnika przewodzenia ciepła od rzeczywistej powierzchni styku, parametrów powierzchni i parametrów materiału. W rozdziale piątym zamieszczono analizę wpływu niektórych założeń przyjętych w rozwiązaniu problemu brzegowego sformułowanego w poprzednim rozdziale na wyniki obliczeń. Zbadano wpływ warunków brzegowych, kątów pochylenia nierówności, metody całkowania numerycznego w elementach powierzchniowych, rozkładu obszarów rzeczywistej powierzchni styku, ruchu względnego ciał. W rozdziale szóstym uogólniono zaproponowany wcześniej model. Wykonano kalibrację parametrów znalezionej funkcji analitycznej (parametrów zaproponowanego modelu) dla powierzchni otrzymanych przy pomocy różnych rodzajów obróbki mechanicznej. Wprowadzono parametr – długość charakterystyczną- który reprezentuje chropowatość powierzchni w proponowanym modelu.

W rozdziale siódmym opisano stanowisko do testu redukcji grubości blachy, zwanego testem SRT. W teście badano m. in. wpływ warunków smarowania i modyfikacji chropowatości powierzchni na

parametry procesu, jednym z tych parametrów była temperatura narzędzia. Przedstawiono wyniki badań (m. in. ewolucję temperatury) wykonanych przez Autora. Wykorzystano je w kolejnym rozdziale pracy do identyfikacji niektórych parametrów opracowanego modelu. W rozdziale 8 przedstawiono uproszczony termomechaniczny model testu SRT. Do obliczenia pracy odkształceń plastycznych (a tym samym ilości generowanego ciepła) zastosowano rozwiązanie analityczne, a następnie wynik tego rozwiązania wykorzystano w analizie termicznej (nieustalony przepływ ciepła) wykonanej przy pomocy MES. W obliczeniach termicznych zastosowano zaproponowany w rozprawie dwuskalowy model przewodzenia ciepła. Porównano wyniki teoretyczne i doświadczalne. Otrzymano zadowalającą zgodność wyników. Rozdział dziewiąty jest podsumowaniem pracy. W Dodatku A zamieszczonym na końcu rozprawy Autor przedstawił podstawy teoretyczne rozwiązania problemu spłaszczania nierówności w obecności tarcia. W sformułowaniu Autora podstawowymi zmiennymi są prędkości a nie przemieszczenia zwykle występujące w równaniach MES. Otrzymane rozwiązanie zostało wykorzystane w rozdziale 2 rozprawy.

2. Ogólna ocena merytoryczna i uwagi szczegółowe

Autor podjął problem wyznaczenia efektywnego, makroskopowego współczynnika przewodzenia ciepła na kontakcie ciał chropowatych. Problem ten jest trudny do rozwiązania ponieważ mamy tu do czynienia z połączeniem zadania mechanicznego i termicznego. Kontakt powierzchni chropowatych jest zwykle wymuszony przez pewną siłę, której odpowiada pewna rzeczywista powierzchnia styku, która kolei jest podstawowym parametrem analizy termicznej. Stąd autor znaczną część pracy poświęcił problemom kontaktu mechanicznego. Należy zaznaczyć, że pomimo istnienia dużej liczby modeli tego problemu, jest on nadal przedmiotem wielu prac i nie jest ostatecznie rozwiązany. Problemowi temu poświęcone są rozdziały 2 i 7 rozprawy oraz dodatek.

W rozdziale 2 przedstawiono rozwiązanie problemu mechanicznego kontaktu podatnej powierzchni chropowatej i sztywnej powierzchni gładkiej, ze szczególnym uwzględnieniem przewidywanej przez model rzeczywistej powierzchni styku α dla przypadku małych ciśnień nominalnych. Przedstawiono znane z literatury wzory umożliwiające wyznaczenie rzeczywistej powierzchni styku w funkcji naprężenia nominalnego lub w funkcji zbliżenia. Wyniki otrzymane przy pomocy znanych z literatury modeli porównano z wynikami obliczeń Autora przy pomocy MES dla powierzchni piaskowanej. Uwzględniono plastyczną deformację nierówności. Rzeczywistą powierzchnię styku otrzymaną przez symulację kontaktu przy pomocy MES porównano również z powierzchnią otrzymaną w wyniku przecięcia nierówności płaszczyzną równoległą do płaszczyzny średniej podobnie jak przy wyznaczaniu krzywej nośności. Ta ostatnia metoda wyznaczania rzeczywistej powierzchni styku nazywana jest przez Autora metodą geometrycznego ścinania. Stwierdzono, że rozkład obszarów kontaktu w obydwu przypadkach jest podobny. Założenie o równości tych rozkładów jest jednym z założeń, które Autor przyjął w swoim modelu opisanym w rozdziale 4, jest ono pewnym uproszczeniem, które można uznać za dopuszczalne.

Omówiono także nieliczne prace poświęcone modelowaniu spłaszczania powierzchni chropowatych przy jednoczesnym odkształceniu makroskopowym zgniatanego elementu. Przedstawiono wpływ jednoczesnego działania tarcia i deformacji makroskopowych. Przedstawiono też wyniki obliczeń dotyczących tego zagadnienia wykonanych przez autora. Autor jednak nie podał jakich powierzchni (obróbek powierzchniowych) dotyczą te obliczenia, a zatem nie wiemy na ile ogólne są przedstawione wyniki. Ta część pracy wskazuje na umiejętność Doktoranta krytycznej oceny istniejących modeli kontaktu mechanicznego i ich weryfikacji przy pomocy własnych obliczeń. Rzeczywista powierzchnia styku jest podstawowym parametrem

kontaktu termicznego, stąd problem wyznaczania tej powierzchni jest bardzo ważny z punktu widzenia zadania jakie postawił sobie Autor.

Rozdział 3 został poświęcony zagadnieniu kontaktu termicznego. Przedstawiono ogólne równania nieustalonego przepływu ciepła wraz z warunkami brzegowymi i mechanizmy transportu ciepła na kontakcie dwóch ciał. Sformułowano definicję kontaktowego oporu cieplnego R_c i kontaktowej przewodności cieplnej określanej również jako efektywny kontaktowy współczynnik przewodzenia ciepła, h_{eff} . Przedstawiono znane z literatury badania doświadczalne mające na celu wyznaczenie kontaktowego oporu cieplnego. Omówiono zaobserwowany doświadczalnie wpływ różnych czynników (temperatura procesu, chropowatość powierzchni, warstwy niemetaliczne) na kontaktowy opór cieplny. Jako osobną grupę przedstawiono prace dotyczące badań doświadczalnych R_c w procesach przeróbki plastycznej metali. Przedstawiono klasyfikację i podstawowe założenia modeli umożliwiających wyznaczenie kontaktowego oporu cieplnego. Omówiono znane z literatury wzory, w których R_c zależy m. in. od rzeczywistej powierzchni styku i przewodności cieplnej kontaktujących się ciał. W niektórych wzorach zamiast rzeczywistej powierzchni styku korzysta się z ciśnienia nominalnego zakładając, że zależność między tymi wielkościami jest znana. Przedstawiono wykresy kontaktowej przewodności cieplnej w funkcji ciśnienia kontaktowego (dla różnych modeli), w których zależy ona od własności mechanicznych (moduł Younga, mikrotwardość), parametrów termicznych i topografii powierzchni kontaktujących się ciał.

W tym rozdziale Autor wykazał się zdolnością wnikliwej oceny aktualnego stanu wiedzy w zakresie termicznego aspektu badanego zagadnienia, wskazując na ograniczenia istniejących modeli i na znaczną liczbę czynników od których zależy rozwiązanie podjętego problemu.

W rozdziałach 4 i 6 zawarto opis podstawowych oryginalnych osiągnięć Autora do których należą opracowanie modelu przepływu ciepła na kontakcie ciał chropowatych w całym zakresie rzeczywistej powierzchni styku oraz znalezienie analitycznej funkcji, w której efektywny kontaktowy współczynnik przewodzenia ciepła zależy od rzeczywistej powierzchni styku, lokalnego kontaktowego współczynnika przewodzenia ciepła, topografii powierzchni reprezentowanej przez długość charakterystyczną i przewodności cieplnej. Sformułowano dwuskalowy model przewodzenia ciepła na kontakcie powierzchni chropowatych. Przyjęto, że w skali mikro przepływ ciepła ma miejsce jedynie w obszarach rzeczywistego styku ciał a rozkład temperatury i strumienia ciepła jest niejednorodny. W skali makro obserwujemy jednorodną temperaturę i strumień ciepła oraz skok temperatury (średniej) na styku dwóch ciał. Dla kontaktujących się ciał zdefiniowano w skali mikro periodyczną komórkę (podobzar) i dla takiej komórki sformułowano problem brzegowy ustalonego przepływu ciepła. Wprowadzono nowy parametr, lokalny kontaktowy współczynnik przewodzenia ciepła, h_{loc} , który był pomijany w modelach opisanych w rozdziale 3. Problem został sprowadzony do analizy półprzestrzeni o niejednorodnym rozkładzie kontaktowego współczynnika przewodzenia ciepła. Efektywny kontaktowy współczynnik przewodzenia ciepła wyznaczono korzystając z uśrednionych (w obszarze kontaktu) wartości strumienia ciepła i temperatury. Przedstawiono w postaci wykresów wyniki obliczeń dla powierzchni piaskowanej, dla różnych wartości rzeczywistej powierzchni kontaktu i lokalnego współczynnika przewodzenia ciepła h_{loc} . Rozkład rzeczywistej powierzchni kontaktu otrzymano przez geometryczne ścinanie nierówności. Znaleziono funkcję analityczną aproksymującą otrzymane wyniki numeryczne. Funkcja ta przedstawia efektywny współczynnik przewodności w zależności od rzeczywistej powierzchni styku i dwóch parametrów zależnych od topografii powierzchni i własności fizycznych ciał pozostających w kontakcie. Model został jasno opisany. Pewne zastrzeżenia może budzić fakt, że pojęcie „komórka periodyczna” jest niekiedy używana zamiennie z pojęciem reprezentatywny obszar. Uwaga ta dotyczy także innych rozdziałów na przykład na str. 66 jest odwołanie do rys. 4.2 jako do rysunku komórki reprezentatywnej podczas gdy jest on podpisany jako komórka periodyczna Ponadto kryteria wyboru periodycznej komórki, której wielkość decyduje o skalowaniu h_{loc} nie zostały jasno przedstawione.

Weryfikacji otrzymanego wzoru na h_{eff} dokonano korzystając z danych doświadczalnych znanych z literatury. Weryfikacja jest dość ograniczona. Na rys.4.9 przedstawiono porównanie wyników uzyskanych przez Autora i wyników doświadczalnych dla przypadku, w którym powierzchnia styku nie przekracza 2 promili. Wyniki przedstawione na rys. 4.10 odpowiadają maksymalnej powierzchni styku 6 promili (punkty niebieskie) lub 2 procent (punkty czerwone). Poza tym nie jest jasne jakie były inne parametry modelu na przykład współczynniki przewodności, czy parametry chropowatości dla badanych doświadczalnie materiałów.

Porównanie z wynikami doświadczalnymi dla większych powierzchni styku (maksimum 10%) jest przedstawione w sposób dość zawily. Wyniki otrzymane przy pomocy innych modeli Autor przedstawia korzystając z jednego uogólnonego wzoru (4.18), w którym h_{eff} jest wyrażone w funkcji m. in. ciśnienia nominalnego. Następnie z wartościami otrzymanymi z tego wzoru Autor porównuje swoje rezultaty na wykresie h_{eff} w funkcji rzeczywistej powierzchni styku. Porównanie to wymagałoby dodatkowych wyjaśnień. Jeden z porównywanych modeli (Greenwooda-Williamsona [34], tabela 4.2) jest modelem kontaktu mechanicznego (sprężystego) i nie jest jasne jak wyznaczane jest h_{eff} przy pomocy tego modelu. Z kolei w innym porównywanym modelu (Yovanovich [114]) wprawdzie wyznaczane jest h_{eff} jednak nie występuje ani ciśnienie nominalne ani rzeczywista powierzchnia styku jako parametr. Autor powinien wyjaśnić w jaki sposób wyniki wspomnianych modeli zostały umieszczone na wykresie 4.11.

Ponadto we wzorze (4.18), z którym autor porównuje swój model występuje parametr k_e (efektywny współczynnik przewodności cieplnej kontaktujących się ciał), natomiast w modelu Autora występują dwa niezależne parametry k_e i h_{loc} . Zgodność swoich wyników z wynikami innych modeli autor uzyskał zmieniając wartość parametru h_{loc} , który nie występuje w sposób jawny w porównywanych modelach, gdyż z założenia przyjęto w nich $h_{\text{loc}} = \infty$. Założenie takie wymienia autor w rozdz. 3. We wzorze (4.18) opisującym inne modele h_{eff} jest proporcjonalne do k_e natomiast w modelu autora h_{eff} jest bardziej złożoną funkcją k_e i h_{loc} , Autor powinien wyjaśnić tę różnicę.

Do oceny swoich wyników przy większych wartościach powierzchni rzeczywistego kontaktu α Autor wykorzystał porównanie z modelem oznaczonym jako WSL [108], rys. 4.13. Jednak wyniki otrzymane przy pomocy tego modelu zostały porównane z wynikami symulacji MES, a nie z wynikami otrzymanymi przy pomocy zaproponowanej przez Autora funkcji analitycznej. Ponadto nie jest jasne jak uwzględniona została topografia powierzchni w tym porównaniu.

Pomimo trudności w porównaniach z innymi modelami, zaproponowana przez autora funkcja analityczna doskonale aproksymuje wyniki eksperymentu numerycznego, a wprowadzając dodatkowy parametr h_{loc} stanowi istotne uogólnienie istniejących modeli.

W rozdziale 6 zastosowano opisane w rozdziale 4 postępowanie do wyznaczenia współczynnika h_{eff} dla powierzchni chropowatych po różnych obróbkach technologicznych. Stwierdzono, że h_{eff} silnie zależy od rodzaju obróbki powierzchniowej. Zmodyfikowano wyrażenie na h_{eff} tak aby h_{eff} zależała od tzw. długości charakterystycznej, która jest parametrem danej powierzchni chropowatej. Wyznaczono długość charakterystyczną oraz parametr β dla 17 powierzchni po różnych obróbkach technologicznych. Porównano wykresy h_{eff} w funkcji α otrzymane przy pomocy zmodyfikowanego wzoru (6.10) oraz przy pomocy symulacji MES dla dwóch rodzajów powierzchni. Otrzymano dobrą zgodność wyników.

Pewnym utrudnieniem dla czytelnika jest fakt, że po wprowadzeniu nowego skalowania współczynnika h_{loc} w zmodyfikowanym wzorze (6.10) wyniki nadal są prezentowane w zależności h_{loc}^* to jest od bezwymiarowego współczynnika lokalnej przewodności cieplnej skalowanego według poprzedniej wersji funkcji na h_{eff} , (z rozdz. 4), gdzie parametrem skalującym była długość komórki periodycznej L . Taka prezentacja utrudnia porównywanie tym bardziej, że nie są podane wartości L dla analizowanych powierzchni, a parametr h_{loc}^* nie występuje w zmodyfikowanym wzorze (6.10). Wydaje się, że dla przejrzystości, na wykresach porównawczych w tym rozdziale powinny występować tylko te wielkości, które występują w funkcji (6.10).

Po analizie szeregu parametrów chropowatości Autor stwierdził, że długość charakterystyczna powierzchni chropowatej wprowadzona we wzorze (6.10) jest liniową funkcją parametrów powierzchni tj. średniej arytmetycznej podziałki w dwóch prostopadłych kierunkach. Podano przekształconą postać wzoru na współczynnik h_{eff} , zależy on od rzeczywistej powierzchni styku, lokalnego współczynnika przewodności kontaktowej, podziałki i współczynnika przewodzenia kontaktujących się materiałów. Wzór ten ma charakter uniwersalny. Przedstawiono porównanie wykresów h_{eff} w funkcji α otrzymanych przy pomocy zaproponowanego wzoru i MES.

Wyniki przedstawione w tym rozdziale (szczególnie analiza 17 rodzajów obróbki powierzchniowej) wskazują, że dla Autora bardzo ważny jest nie tylko aspekt teoretyczny, ale także praktyczne zastosowanie jego modelu. Istotnym osiągnięciem jest wskazanie parametru chropowatości, wyznaczanego przy pomocy standardowego oprogramowania do analizy topografii, który reprezentuje w zaproponowanej przez Autora funkcji topografię danej powierzchni chropowatej.

W rozdziale 5 przeanalizowano wpływ różnych założeń przyjętych w symulacjach przepływu ciepła na otrzymane wyniki. W przedstawionych w pracy obliczeniach termicznych MES przyjęto, że kontaktujące się powierzchnie są płaskie i jest zadany niejednorodny rozkład kontaktowego współczynnika przewodzenia ciepła. Rozkład ten wynika z rozkładu pól przecięcia nierówności płaszczyzną, równoległą do płaszczyzny średniej (geometryczne ścinanie). Informacje o rozkładzie zawarte są w czterowęzłowych (w przypadku analizy 3D) elementach powierzchniowych. Dokładność odwzorowania tego rozkładu rzeczywistego kontaktu zależy od przyjętego schematu całkowania. Porównano efekt całkowania w punktach Gaussa oraz w punktach węzłowych. Zasadność założenia o płaskości kontaktujących się powierzchni została zweryfikowana poprzez ocenę wpływu kąta pochylenia nierówności, który jest pomijany w przyjętym modelu kontaktu. Założenie to jest ważne, gdyż umożliwia znaczne zmniejszenie kosztów rozwiązania zadania. Wydaje się, że ocena ta została potraktowana przez Autora zbyt ogólnie, gdyż została ograniczona do analizy przepływu ciepła przez jedną dwuwymiarową (klinową) nierówność. Interesujące byłoby porównanie wyników modelu przyjętego przez Autora i obliczeń MES, w których uwzględniona jest rzeczywista chropowatość (3D) dla reprezentatywnego obszaru, przynajmniej dla jednej z 17 rodzajów modelowanych powierzchni chropowatych. Zbadano także wpływ wielkości komórki reprezentatywnej, rodzaju warunków brzegowych przyjmowanych na ściankach bocznych tej komórki oraz wpływ różnych wartości współczynników przewodzenia ciepła kontaktujących się ciał. Przeanalizowano wpływ ich ruchu względnego, co jest oryginalnym osiągnięciem Autora.

W tej części pracy Autor wykazał się umiejętnością posługiwania się metodami numerycznymi (z uwzględnieniem wielu istotnych szczegółów MES) w rozwiązywaniu stacjonarnych i niestacjonarnych problemów brzegowych. Potwierdził słuszność istotnych założeń przyjętych w zaproponowanym modelu. Zbadanie wpływu wzajemnego przemieszczenia chropowatych powierzchni na wartość efektywnego kontaktowego współczynnika przewodzenia ciepła jest oryginalnym osiągnięciem w tej części pracy.

Rozdział 7 został poświęcony praktycznemu problemowi przeróbki plastycznej. Opisano stanowisko badawcze służące do testu redukcji grubości blachy zwanego testem SRT oraz mikroplastyczne mechanizmy smarowania. W teście tym blacha przeciągana jest między nieruchomym walcowym narzędziem i płytą podstawy. Przedstawiono wyniki badań wykonanych na tym stanowisku, w których uczestniczył autor rozprawy. Badano wpływ topografii powierzchni blachy i środków smarnych na proces redukcji grubości. Mierzona była również siła przeciągania i temperatura narzędzia w trakcie procesu. Podano wykresy temperatury w wybranych punktach narzędzia w funkcji czasu dla różnych parametrów procesu. Proces przepływu ciepła między narzędziem i obrabianą blachą o określonej topografii został wykorzystany do kalibracji parametrów modelu zaproponowanego przez autora.

W rozdziale 8 zaprezentowano uproszczony model testu SRT. Przyjęto, że ciepło generowane jest na skutek odkształceń plastycznych blachy podczas przeciągania oraz tarcia. Pracę

odkształceń i pracę tarcia obliczono korzystając z uproszczonych wzorów, przyjęto że praca ta jest źródłem ciepła w rozwiązywanym przy pomocy MES problemie termicznym. Współczynnik przewodności kontaktowej h_{eff} był jednym z parametrów tego zadania. Otrzymane wyniki porównano z wynikami pełnej analizy termomechanicznej oraz z wynikami doświadczalnymi przedstawionymi w rozdziale 7. Wyznaczono niektóre parametry modelu z warunku minimalizacji różnicy temperatur otrzymanych teoretycznie i doświadczalnie. Identyfikowane w ten sposób parametry to lokalny, kontaktowy współczynnik przewodzenia ciepła i współczynnik tarcia. Nie sprecyzowano jednak jakie były wartości pozostałych parametrów zastosowanego modelu na przykład podziałki.

Wyznaczone parametry modelu posłużyły do wyznaczenia temperatury w procesie SRT dla różnych parametrów procesu. Wartości temperatury otrzymane teoretycznie różnią się od doświadczalnych, może to wynikać nie tylko z mało precyzyjnego oszacowania h_{eff} przy pomocy funkcji Autora ale także z wielu założeń upraszczających przyjętych do symulacji testu SRT. Z tego względu pewne zastrzeżenia może budzić korzystanie z testu SRT, którego opis jest bardzo złożony, do weryfikacji modelu Autora.

W tej części pracy autor wykazał umiejętność tworzenia uproszczonych modeli mechanicznych i poradzenia sobie z modelowaniem dość złożonego problemu przeróbki plastycznej bez odwoływania się do MES. Dokonał weryfikacji tego modelu. Korzystając ze swojego uproszczonego modelu otrzymał wyniki podobne jak przy pełnej termomechanicznej analizie problemu. Przedstawił praktyczne zastosowanie opracowanego modelu przepływu ciepła na kontakcie powierzchni chropowatych.

Przedstawione wyżej krytyczne uwagi mogą być wykorzystane przez Autora w kolejnych publikacjach i nie wpływają na ogólną pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława Sadowskiego.

Podsumowując, zawartość merytoryczna rozprawy wskazuje na przyswojenie przez doktoranta odpowiedniej wiedzy z dziedziny mechaniki i metod komputerowych oraz zdolność poszerzenia tej wiedzy. Autor poświęcił dużo miejsca nie tylko zagadnieniu przepływu ciepła jak wskazywałby tytuł rozprawy, ale także złożonym problemom odkształcania ciał chropowatych w procesie kontaktu. Rozprawa nawiązuje do praktyki, autor przebadał możliwość zastosowania swojego modelu do kilkunastu rodzajów rzeczywistych powierzchni chropowatych, a swoje wyniki teoretyczne porównywał z wynikami eksperymentów, w których wykonaniu brał udział. Praca jest starannie zredagowana, układ pracy jest właściwy. Znaczna część wyników prezentowanych w pracy stanowi oryginalny wkład Autora w rozwiązywanie problemów mechaniki kontaktu.

3. Wniosek końcowy

Autor podjął się rozwiązania trudnego zadania jakim jest opracowanie stosunkowo prostego modelu opisującego złożony proces przepływu ciepła między ciałami chropowatymi pozostającymi w kontakcie. Proces ten, szczególnie w przypadku badań eksperymentalnych rozpatrywany jest zwykle w połączeniu z innym trudnym problemem to jest kontaktem mechanicznym powierzchni chropowatych. Wymagało to od Autora opanowania wiedzy z obydwu tych dziedzin. Rozprawa doktorska mgr inż. Przemysława Sadowskiego zawiera elementy stanowiące oryginalny wkład Autora do rozwiązywania problemów kontaktowych mechaniki. Autor wykazał dużą wiedzę i przygotowanie zarówno w dziedzinie mechaniki jak i w zastosowaniu zaawansowanych metod komputerowych w mechanice. Uważam, że praca spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych i może być dopuszczona do publicznej obrony przed Komisją Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN.

Alachon