

Prof. dr hab. Piotr Perzyna
IPPT PAN

Recenzja rozprawy habilitacyjnej i dorobku naukowego dr Katarzyny Kowalczyk-Gajewskiej p.t. "Micromechanical modelling of metals and alloys of high specific strength"

1. Cel rozprawy habilitacyjnej

Omawiana rozprawa poświęcona jest mikromechanicznemu modelowaniu konstytutywnemu oraz jego szerokiej analizie i wykorzystaniu do opisu metali i stopów o wysokiej wytrzymałości właściwej. Autorka uzasadnia, że metale i stopy charakteryzujące się wysokim stosunkiem wytrzymałości i sztywności do gęstości materiału wykazują zwykle niską ciągliwość i formowalność. Są to cechy niepożądane, które ograniczają ich szerokie zastosowanie w nowoczesnej technologii inżynierskiej. Podkreśla się jednak, że te właściwości są wynikiem określonej mikrostruktury. Bowiem większość opisywanych w rozprawie materiałów charakteryzuje się niską symetrią sieci, co w konsekwencji powoduje, że nie ma wystarczającej liczby łatwych systemów poślizgów powstających podczas deformacji niesprężystej. Nie jest spełniony warunek Taylora, który zakłada, że liczba łatwych systemów poślizgów dostępnych w materiale jest równa pięć. Wtedy może wystąpić inny mechanizm deformacji plastycznej jakim jest bliźniakowanie.

Podobne zjawiska są obserwowane na poziomie micro dla stopów cyrkonu lub związków międzymetalicznych Fe-Al. Choć materiały te nie wykazują wysokiej wytrzymałości właściwej to jednak charakteryzują się wyjątkową odpornością na korozję.

Autorka rozprawy podkreśla, że dla wielu wcześniej opisanych metali i związków międzymetalicznych ważne jest również występowanie mikro struktur lamelarnych powstałych, czy to na skutek obróbki termicznej lub wytwarzanych podczas bliźniakowania.

Powstanie takiej mikrostruktury wpływa na aktywność poszczególnych postaci deformacji wyodrębniając te, które mają korzystną orientację względem geometrii powstałego laminatu. Oba zjawiska, tzn. niespełnienie warunku Taylora przez zbiór możliwych łatwych systemów poślizgu oraz wystąpienie kierunkowych efektów typu Halla-Petcha związanych z istnieniem mikrostruktury lamelarniej, wskazują na obecność więzów nałożonych na deformację niesprężystą na poziomie mikro pojedynczego ziarna. Powyższe cechy omawianych materiałów powodują w procesach formowania (np. walcowania lub przeciągania) tworzenie się silnych tekstur krystalograficznych, co manifestuje się na poziomie makroskopowym charakterystyczną anizotropią właściwości materiału.

Z tych powodów analiza mikromechaniczna wydaje się być naturalną metodą badań pozwalającą zrozumieć i opisać związki między mikrostrukturą analizowanych materiałów a ich właściwościami makroskopowymi.

Stąd staje się jasny główny cel rozprawy habilitacyjnej, który postawiła sobie dr Katarzyna Kowalczyk-Gajewska, a mianowicie opracowanie metod mikromechanicznej analizy sprężysto-(lepkoplastycznych polikryształów metali i stopów o wysokiej sztywności i wytrzymałości właściwej.

2. Omówienie treści rozprawy habilitacyjnej

Rozprawa habilitacyjna dr Katarzyny Kowalczyk-Gajewskiej jest napisana w języku angielskim i składa się z siedmiu rozdziałów, trzech dodatków, bibliografii oraz dość szczegółowego streszczenia w języku polskim.

W rozdziale pierwszym przedstawiono uzasadnienie podjętego zagadnienia rozprawy, cel i zakres badań oraz ich znaczenie jak również wyjaśniono stosowaną w rozprawie notację.

Rozdział drugi przynosi opis konstytutywny zachowania się pojedynczego ziarna z uwzględnieniem mechanizmu bliźniakowania. Wykorzystano prawo Schmidta dla opisu niezależnego od prędkości deformacji oraz koncepcję Hutchinsona (1976) oraz Asaro i Needlemana (1985) dla opisu lepkoplastycznego. Opis niezależny od prędkości deformacji jest rozwinięciem propozycji zaproponowanej przez Gambina (1992).

W rozdziale tym opisano również zjawisko wzmocnienia wykorzystując znane z literatury propozycje. Sformułowano prawo wzmocnienia uwzględniające różne sprzężenia zachodzące pomiędzy poślizgiem a bliźniakowaniem.

W rozdziale trzecim zaproponowano metody szacowania właściwości makroskopowych materiałów polikrystalicznych opisanych liniowym prawem konstytutywnym.

Rozważana jest określona klasa materiałów niejednorodnych, a mianowicie polikryształy, w szczególności zaś te, które zbudowane są z kryształów o niskiej symetrii sieci i silnej anizotropii właściwości lokalnych. Właściwości materiału opisane są tensorem czwartego rzędu typu Hooke'a. Zbadano dwa rodzaje orientacji w agregacie:

- (i) brak tekstury (orientacja losowa) prowadzący do izotropii właściwości makroskopowych;
- (ii) tekstury włókniste, dla których jeden z kierunków krystalograficznych ma taką samą orientację względem kierunków próbki dla wszystkich ziaren w agregacie. Tektura taka prowadzi do anizotropii (izotropii poprzecznej) właściwości makroskopowych.

Przeanalizowane zostały ograniczenia dolne i górne na tensor makroskopowych właściwości materiału.

Wykorzystując inwariantne rozkłady tensora o walencji cztery, znaleziono odpowiednie wzory analityczne, pozwalające oszacować makroskopowe moduły sztywności dla liniowej sprężystości czy naprężenia płynięcia dla liniowego ustalonego pełzania.

Część rezultatów tego rozdziału została opublikowana wcześniej w pracy Kowalczyk-Gajewska (2009).

Rozdział czwarty jest poświęcony rozszerzeniu stosowalności metod wewnętrznie-zgodnych opracowanych dla liniowych związków konstytutywnych na klasę materiałów opisanych nieliniowymi prawami konstytutywnymi. Szczegółowo zbadano makroskopowe właściwości lepkoplastycznych polikryształów γ -TiAl i Mg o losowej teksturze. Zaobserwowano znaczne różnice pomiędzy przewidywaniami analizowanych modeli (siecznemu Hutchinsona (1976), stycznemu Lebensona i Tomé'a (1993) oraz afinicznemu Massona et al. (2000)). Różnice te były tym większe, im większa była intensywność anizotropii lokalnej.

Przeanalizowano również wpływ mechanizmu bliźniakowania, a w szczególności jednokierunkowość tego mechanizmu, na wartość różnych oszacowań typu wewnętrznie-zgodnego.

W rozdziale piątym zajęto się opisem trójskalowego modelu mikromechanicznego opisującego substruktury lamelarne. W nowoczesnych stopach o wysokiej wytrzymałości substruktury lamelarne odgrywają bardzo ważną rolę. Dlatego ich obecność powoduje wprowadzenie oprócz tradycyjnych w mikromechanice dwóch poziomów rozważań: skali mikro pojedynczego ziarna i skali makro elementu polikrystalicznego-pośredniego poziomu, który odpowiadał będzie skali lamelnego metaziarna.

Przedyskutowane zostały procedury implementacji zaproponowanego modelu trójskalowego zarówno dla liniowych jak i nieliniowych związków konstytutywnych oraz złożonych różnych schematów przejścia mikro-makro z poziomu metaziarna do poziomu polikryształu zbudowanego z metaziarn. Przedstawiono również propozycję rozszerzenia opracowanego formalizmu na duże deformacje niesprężyste. Przeprowadzone opisy stanowią oryginalny wkład autorki, por. Kowalczyk-Gajewska (2010).

Rozdział szósty poświęcony jest opracowaniu metod przejścia mikro-makro dla sprężysto-lepkoplastycznych materiałów niejednorodnych. Zaproponowano oryginalną koncepcję polegającą na zrezygnowaniu z próby jednoczesnego uwzględnienia sprężystych i lepkich właściwości matrycy w ramach pojedynczego kroku obliczeniowego w przyrostowym schemacie przejścia mikro-makro, a w zamian aby dla danego kroku uwzględniać właściwości sprężyste i lepkie sekwencyjnie. Tak więc, zamiast rozwiązywać jedno zagadnienie Eshelby'ego dla liniowej matrycy z niejednorodnością, rozwiązuje się sekwencję takich zagadnień o różnym typie interakcji pomiędzy matrycą a niejednorodnością, w szczególności sprężystych i lepkich. Całkowita odpowiedź materiału jest następnie wyznaczona przy wykorzystaniu odpowiednich założeń wiążących podproblemy ze sobą. Ograniczono się do rozważań tylko małych odkształceń. Wykazano, że wykorzystując zaproponowaną metodę otrzymuje się zadawalające rezultaty. Na przykładzie γ -TiAl zaproponowano możliwości zastosowania opracowanej metody do modelowania polikryształów o wysokiej wytrzymałości.

W rozdziale siódmym dr Katarzyna Kowalczyk-Gajewska przedstawiła posumowanie najważniejszych rezultatów, sformułowała pewne wnioski i wskazała kierunki dalszych badań naukowych.

W trzech dodatkach omówiony został rozkład spektralny i harmoniczny tensora czwartego rzędu, rozwiązanie Eshelby'ego oraz podstawy modelu wewnątrznie-zgodnego ciał niejednorodnych i pewne zagadnienia związane z implementacją numeryczną proponowanych w pracy metod.

Przedstawiona bibliografia cytowanych w rozprawie habilitacyjnej prac (229) jest dość szeroka.

3. Uwagi krytyczne

- (i) Pominięcie w całych rozważaniach efektów termicznych jest dużym uproszczeniem, szczególnie dotyczyło to rozdziałów, w których opisywane są skończone deformacje. Należy zaznaczyć, że nowoczesne metale i stopy o wysokiej wytrzymałości są stosowane w technologii w urządzeniach, które często pracują w podwyższonych temperaturach.
- (ii) Autorka rozważając deformacje sprężysto-lepkoplastyczne opisuje je najprostszym modelem zaproponowanym przez Hutchinsona (1976) oraz Asaro i Needlemana

- (1985). Wiadomo, że model ten dobrze opisuje właściwości sprężysto-lepkoplastyczne tylko w zakresie małych prędkości deformacji. Autorka rozprawy habilitacyjnej nawet nie wspomniała, że dziedzina lepkoplastyczności jest bardzo szeroko rozwijana i istnieje kilka znanych modeli opisujących prawidłowo właściwości materiału dla bardzo dużych zakresów prędkości deformacji. Jednocześnie należy dodać, że model wykorzystany przez Autorkę nie ma dobrze opracowanych podstaw fizykalnych.
- (iii) Autorka całą garścią korzysta z istniejących koncepcji w literaturze, które w ciekawy sposób adoptuje do nowych dziedzin i rozwija.
 - (iv) Opis konstytutywny analizowany przez Autorkę jest niezmienniczy względem dowolnego ruchu sztywnego. Autorka używa słowa obiektywność nie precyzując w jakim sensie.
 - (v) W rozdziale 2 pomija się w rozważaniach pewien człon $\mathbf{P}^f \cdot \mathbf{P}^d$ nie analizując głębiej tego uproszczenia. Autorka nie interesuje się nawet prostym pytaniem jakiego rzędu jest to wielkość, którą pomijamy w porównaniu z członami, które pozostają w analizowanym równaniu. Nie zostają określone warunki, kiedy ten człon nie będzie miał istotnego wpływu na rezultaty.
 - (vi) Cała sekcja 2.3.4 dotycząca zjawisk wzmocnienia jest wzięta w sensie koncepcyjnym z literatury.
 - (vii) Opis warunku 2.11 jest mało precyzyjny. W nawiasie powinno być podane ekwiwalentne odkształcenie zamiast prędkości odkształcenia.
 - (viii) Brak bardzo ważnej części w pracy habilitacyjnej jaką jest prawidłowa identyfikacja wszystkich funkcji i stałych materiałowych bazująca na dostępnych poprawnych rezultatach obserwacji doświadczalnych. Dopiero po przeprowadzeniu prawidłowej identyfikacji opis konstytutywny materiału jest użyteczny, czyli może być stosowany w praktyce.
 - (ix) Autorka w całej rozprawie używa terminu „the regularized Schmid law”, który jest mylący i nie oddaje istoty prawa Schmid’a, bowiem słowo „regularize” jest, w literaturze dotyczącej mechaniki ciał niesprężystych, używane wtedy, kiedy dotyczy regularyzowania matematycznych problemów początkowo-brzegowych (aby były dobrze postawione).
 - (x) Podobnie na str. 172 Autorka nieprawidłowo używa terminu który w literaturze jest używany „internal state variables” i ma ugruntowane znaczenie, co odpowiada w języku polskim parametrom wewnętrznym. W tym przypadku lepiej należało użyć „intrinsic variables”.

4. Ocena rozprawy habilitacyjnej

Główny cel rozprawy, a mianowicie opracowanie metod mikromechanicznego opisu sprężysto-(lepkoplastycznych) polikryształów metali i stopów o wysokiej wytrzymałości właściwej, został przez dr Katarzynę Kowalczyk-Gajewską w pełni zrealizowany.

Rozprawa habilitacyjna przynosi bowiem bardzo szeroką analizę i przedstawia nowe koncepcje modelowania kryształów deformujących się przez poślizg i bliźniakowanie, proponuje opisy makroskopowych polikryształów oraz bardzo szeroko analizuje modele konstytutywne metali o substrukturze lamelarniej.

Cała rozprawa napisana jest jasno, widać dbałość o prawidłowy opis matematyczny oraz dobrze uzasadnione rozważania natury fizykalnej.

Na szczególne podkreślenie zasługuje szerokie wykorzystanie inwariantnych rozkładów tensora o walencji cztery do zaproponowania odpowiednich wzorów analitycznych, które

pozwołyły oszacować makroskopowe moduły sztywności dla liniowej sprężystości oraz naprężenia płynięcia dla liniowego ustalonego pełzania.

Tak więc, rezultaty otrzymane w rozprawie habilitacyjnej dr Katarzyny Kowalczyk-Gajewskiej stanowią bezpośredni wkład do rozwoju naukowego mechaniki ciała stałego, ale jednocześnie można oczekiwać, że przyczynią się również do szerokiego wykorzystania w nowoczesnej praktyce dotyczącej inżynierii materiałowej.

5. Ocena dorobku naukowego

Dr Katarzyna Kowalczyk-Gajewska ukończyła studia doktoranckie w IPPT PAN obroną pracy doktorskiej (10.05.2001) nt. „Ewolucje anizotropii plastycznej silnie deformowanych metali”.

Od 18.06.2001 jest zatrudniona w IPPT PAN, gdzie obecnie pracuje w Zakładzie Mechaniki Materiałów na stanowisku adiunkta.

Opublikowała 1 monografię p.t. *Plastyczność Metali* (2003), 12 artykułów w czasopismach z listy filadelfijskiej, 10 artykułów w innych czasopismach recenzowanych oraz 15 artykułów w tomach konferencyjnych.

Brała udział w wielu konferencjach naukowych w kraju i zagranicą.

Uczestniczyła w realizacji kilku projektów badawczych z Unii Europejskiej, KBN oraz MNiSW.

Rozwój naukowy dr Katarzyny Kowalczyk-Gajewskiej jest bardzo konsekwentny. Jej zainteresowanie naukowe są skoncentrowane na trzech głównych zagadnieniach:

- (i) Modelowanie ewolucji anizotropii plastycznej wywołanej rozwojem tekstury krystalograficznej w metalach.
- (ii) Opis właściwości anizotropowych materiałów przy wykorzystaniu rozkładów inwariantnych tensora IV-tego rzędu.
- (iii) Analiza istniejących oraz rozwijanie nowych metod przejścia mikro-makro w ramach mikromechaniki.

Te trzy główne kierunki badań były rozwijane bardzo aktywnie, przyniosły wiele publikacji naukowych w czasopismach oraz publikację rozprawy habilitacyjnej. Dotychczas uzyskane wyniki badań naukowych dr Katarzyny Kowalczyk-Gajewskiej są ciekawe i stanowią bardzo ważny wkład do rozwoju mechaniki ciała stałego.

Uczestniczyła w wielu konferencjach naukowych w kraju i zagranicą wygłaszając na nich referaty naukowe dotyczące rezultatów własnych badań.

Trzeba dodać, że dr Katarzyna Kowalczyk-Gajewska współpracuje naukowo z wieloma osobami z IPPT PAN i Politechniki Warszawskiej oraz bardzo dobrze włączyła się w pracę organizacyjną w Sekcji Mechaniki Konstrukcji i Materiałów Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz w Sekcji Mechaniki Materiałów Komitetu Mechaniki PAN, jak również w Komitecie Redakcyjnym *Engineering Transactions IPPT PAN* i *ENIM Metz*.

6. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę moją bardzo dobrą ocenę rozprawy habilitacyjnej dr Katarzyny Kowalczyk-Gajewskiej p.t. „*Micromechanical modelling of metals and alloys of high specific strength*” oraz bardzo dobrą ocenę Jej dorobku naukowego uważam, że zostały spełnione wszystkie warunki aby dopuścić Ją do kolokwium habilitacyjnego w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN.

Warszawa, dnia 1 grudnia 2011

Piotr Perzyna