



Kraków, 23.12.2015.

Prof. Maciej Pietrzyk

Recenzja

poprawionej wersji pracy doktorskiej mgr inż. Szymona Nosewicza pt. "Discrete element modeling of powder metallurgy processes".

Zlecenie na opracowanie recenzji otrzymałem od Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN pismem z dnia 3 grudnia 2015 roku. Po zapoznaniu się z nową wersją rozprawy doktorskiej mgr inż. Szymona Nosewicza przedstawiam poniższą opinię.

1. PRZEDMIOT OCENY

Przedmiotem oceny jest licząca 163 strony praca doktorska napisana w języku angielskim składająca się ze spisu treści, wstępu, 5 rozdziałów zasadniczych oraz wniosków, spisu literatury i trzech aneksów, zawierająca 109 rysunków i 18 tablic. Spis literatury obejmuje 245 pozycji. W spisie literatury zawarto znane mi najważniejsze prace związane z tematyką rozprawy. Prace uzupełniają streszczenia w języku polskim i angielskim.

2. OGÓLNA OCENA PRACY

Wiele gałęzi przemysłu, głównie lotniczy i motoryzacyjny ale także szereg innych, ciągle poszukuje materiałów o specjalnych, wysokich własnościach mechanicznych. Takie cechy materiałów jak wysoki iloraz wytrzymałości i masy lub połączenie dobrych własności wytrzymałościowych i plastycznych są wymagane przez przemysł. W wielu laboratoriach naukowych prowadzone są badania nad otrzymywaniem nowych materiałów spełniających te wysokie wymagania. Materiały kompozytowe odgrywają tutaj kluczową rolę. Są to zarówno kompozyty uzyskiwane przez połączenie różnych materiałów jak i przez wytworzenie różnych faz w jednym materiale, np. stałe wielofazowe. Projektowanie takich materiałów wymaga kosztownych prób doświadczalnych i numeryczne modelowanie jest narzędziem wspomagającym badania i pozwalającym często na znaczne obniżenie ich kosztów. W tym aspekcie uważam wybór tematyki pracy za w pełni uzasadniony.

Tytuł rozprawy odpowiada jej treści. Autor zaplanował i konsekwentnie zrealizował sekwencję badań doświadczalnych i rozważań teoretycznych zmierzających do zbudowania modelu opisującego procesy w metalurgii proszków. Problem modelowania przetwórstwa materiałów proszkowych jest w centrum zainteresowania naukowców od wielu lat. Rozwój modeli jest stymulowany wzrostem mocy obliczeniowej komputerów i obecnie dostępnych jest szereg modeli od konwencjonalnych analityczno-empirycznych rozwiązań po współczesne nowoczesne metody numeryczne. W rozdziale 1 rozprawy Autor przedstawił skrócony ale bogaty w informacje przegląd najnowszych modeli, grupując je ze względu na sposób opisu materiału (proszku). Pewna niekonsekwencja pojawia się na stroni 9 gdzie w wierszach 3-4 Doktorant pisze, że omówione modele nie uwzględniały dodatkowych zewnętrznych sił. Wcześniej cytowane są prace [80,130,172, 233], w których modelowano spiekanie pod ciśnieniem. W tej grupie wymienić można pracę Ludinga i in. [130], w której badano poprzez

modelowanie wpływ sił zewnętrznych i czasu spiekania na własności spieku. Zabrakło też podsumowania przeprowadzonej analizy modeli, która pokazywałaby słabe strony tych modeli i umiejscawiała obecną pracę w tych obszarach. Sformułowane cele pracy jako: i) opracowanie własnego modelu dyskretnego, ii) badania doświadczalne spiekania oraz iii) weryfikacja i walidacja modelu są przejrzyste. Brak jest jednak podania już w tym miejscu jakie cele mają wyróżnić model od dostępnych w literaturze i co w tezie pracy oznacza „oryginalny model”. Dopiero w dalszej części rozprawy Doktorant wyjaśnia, że oryginalnością jest zastosowanie cieplno-lepko-sprężystego modelu materiału.

W rozdziale 2 Autor podaje podstawowe informacje o procesie spiekania. W pracy zawarto zwięzły opis mechanizmów występujących w tym procesie oraz ich termodynamiczne podstawy, przede wszystkim siłę pędą spiekania. Ten rozdział potwierdza wiedzę Autora o badanym procesie i umiejętność uwypuklenia kluczowych aspektów ważnych dla modelowania. Pewnym mankamentem jest brak ujęcia w analizie wpływu sił zewnętrznych. Nie zmienia to faktu że materiał zawarty w rozdziale 2 ma istotne znaczenie a jednym z wniosków jest uwypuklenie trudności związanych z uwzględnieniem w modelach w sposób jawny wszystkich mechanizmów odpowiedzialnych za proces spiekania. Na podstawie przeprowadzonej analizy Doktorant w dalszej części pracy zaproponował szereg szczegółowych rozwiązań, które pozwoliły Mu opracować efektywny i dokładny, dyskretny model procesu spiekania.

W rozdziale 3 rozprawy opisano doświadczenia fizyczne przeprowadzone przez Doktoranta. Jest to bardzo wartościowa część pracy. Badania zostały zaplanowane kompleksowo mając na uwadze cel, jakim było dostarczenie danych do identyfikacji i weryfikacji modelu. Badania objęły przygotowanie materiału wsadowego i wyznaczenie jego własności, a następnie przeprowadzenie fizycznych symulacji procesu spiekania. Wykonane elementy poddano badaniom własności mechanicznych i mikrostruktury. Zastosowano specyficzne metody badawcze adekwatne do własności badanych wyrobów, np. próba brazylijska. Przeprowadzane badania dostarczyły danych niezbędnych do budowy modelu konstytutywnego, takich jak własności materiału, zmiana gęstości w czasie spiekania i zależność własności mechanicznych od gęstości. Pozytywnie oceniam tą część pracy i całość badań doświadczalnych (fizycznych) uznaję za znaczące osiągnięcie Doktoranta.

Głównymi celami pracy są budowa i identyfikacja modelu numerycznego procesu spiekania, opisującego ten proces w różnych skalach wymiarowych. Autor stara się osiągnąć ten cel w kilku etapach. W pierwszym przedstawił założenia przyjęte przy tworzeniu modelu, które są poprawne. Następnie zamieszczone zostały podstawowe równania modelu, obejmujące równania ruchu, opis styku cząstek i opis spiekania dwóch cząstek. Model reologiczny przedstawiono w dwóch wariantach, model Kelvina-Voigta dla opisu zachowania się ciała stałego i model Maxwella dla opisu płynięcia materiału. Wynikiem jest zależność opisująca względną prędkość cząstek z uwzględnieniem zjawisk cieplnych, sprężystych i lepkich. Dalszy opis modelu numerycznego zawiera zastosowany schemat całkowania oraz analizę stabilności rozwiązania, a także opis skalowania parametrów dla obniżenia kosztów obliczeń. W identyfikacji fizycznych parametrów modelu takich jak współczynnik dyfuzji czy współczynniki modelu cieplno-lepko-sprężystego w pierwszym podejściu wykorzystano dane dostępne w literaturze. W dalszej części pracy identyfikację przeprowadzono na podstawie badań doświadczalnych opisanych w rozdziale 2.

Opracowany przez Doktoranta model wykorzystano w rozdziale 5 do numerycznej symulacji procesów metalurgii proszków. Ta część pracy jest logicznie zaplanowaną sekwencją numerycznych symulacji, pozwalających kolejno na identyfikację modelu oraz na weryfikację i ocenę poszczególnych składowych modelu. W konsekwencji Autor opracował efektywny model dyskretny cyklu spiekania, który zastosował do symulacji całego cyklu oraz poszcze-

gólnych procesów w różnych warunkach. Symulacje spiekania dwóch cząstek posłużyły do oceny poprawności przyjętego rozwinięcia modelu o część sprężystą. Porównanie wyników wykazało prawidłowość działania rozszerzonego modelu, a korzyścią z jego zastosowania było znaczne skrócenie czasów obliczeń poprzez wydłużenie kroku czasowego. W tej części pracy oceniono też wpływ ciśnienia na szybkość spiekania.

W drugiej części rozdziału 5 opisano symulacje cyklu procesów składających się na cały proces spiekania. Symulacje wykonano dla materiałów jednofazowych i materiału dwufazowego. Symulacje dla materiałów jednofazowych w połączeniu z wynikami symulacji fizycznych posłużyły do identyfikacji modeli materiału. Symulacje dla materiału dwufazowego posłużyły do dalszej identyfikacji, a następnie weryfikacji i walidacji modelu. Identyfikacja objęła parametry modelu styku dwóch cząstek z różnych materiałów. Walidacja obejmowała symulacje cyklu wytwarzania spieku wykonane dla różnych temperatur i różnych ciśnień. Weryfikacja obejmowała porównanie zmierzonych i obliczonych zmian gęstości w czasie spiekania. W tych ostatnich testach otrzymano większe rozbieżności między pomiarami i obliczeniami. Doktorant przypisuje te rozbieżności przyjęciu kulistych cząstek, podczas gdy badania doświadczalne wykazały że kształt cząstek odbiega od kulistego. Założenie kulistego kształtu spowodowało przeszacowanie wzrostu gęstości. Wskazana byłaby bardziej dogłębna analiza przyczyn mniejszej dokładności modelu w tych symulacjach. Niezależnie od tych rozbieżności między pomiarami i obliczeniami uważam, że Doktorant opracował poprawny model zawierający nowatorskie aspekty w stosunku do modeli opublikowanych w literaturze.

Rozdział 6 pracy zawiera opis zastosowania modelu do wyznaczenia naprężeń w spiekającym materiale. Te obliczenia dostarczyły informacji, które mogą być pomocne w ocenie tendencji do pęknięcia cząstek w różnych warunkach prowadzenia procesu.

3. UWAGI SZCZEGÓŁOWE

Jak już wspomniałem w recenzji, projektowanie procesów wytwarzania materiałów charakteryzujących się skomplikowaną budową, a do takich zaliczam materiały otrzymywane z proszków, wymaga często kosztownych prób doświadczalnych obejmujących symulacje fizyczne cyklu produkcyjnych. Numeryczne modelowanie jest narzędziem wspomagającym takie badania i pozwalającym często na znaczne obniżenie ich kosztów. Opiniowana praca stanowi przyczynek do wykorzystania numerycznego modelowania jako narzędzia wspomagającego projektowanie wytwarzania wyrobów z materiałów proszkowych. W pracy zawarto obszerny, uzyskany na drodze dużego nakładu pracy, materiał dotyczący trudnego problemu teoretycznego opisu zachowania się proszku w czasie spiekania. Główne osiągnięcie naukowe rozprawy leży po stronie rozwiązania numerycznego. Doktorant opracował oryginalny model wykorzystujący nowoczesną metodę numeryczną i opisujący skomplikowane zjawiska zachodzące między cząstkami proszku w procesie spiekania. Nie jest mi znane takie rozwiązanie w literaturze naukowej. Korekty wprowadzone w pracy nie dotyczyły opisu rozwiązania numerycznego stąd moja opinia nie różni się od opinii pierwotnej wersji pracy. Można wyróżnić szereg szczegółowych osiągnięć Autora zawartych w opiniowanej pracy, takich jak:

1. Opracowanie, identyfikacja i weryfikacja autorskiego modelu procesu spiekania. Model wykorzystuje nowoczesną metodę elementów dyskretnych i zawiera nowe aspekty w stosunku do istniejących modeli tego procesu. Opracowany model lepko-sprężysty charakteryzuje się krótszymi czasami obliczeń niż model idealnie lepki. Opis modelu przeprowadzono z zastosowaniem formalizmu matematycznego, a numeryczną implementacją wykonano z zachowaniem niezbędnych działań obejmujących analizę stabilności rozwiązania oraz ocenę zbieżności i kosztów obliczeń. Na podkreślenie zasługuje położenie przez Doktoranta dużego nacisku na prawidłową identyfikację parametrów modelu.

2. Opracowanie algorytmu i programu dla generowania początkowej struktury spieku zarówno dla materiału jednofazowego jak i 2-fazowego. Struktura została wygenerowana z wykorzystaniem dynamicznego rozwiązania metodą elementów dyskretnych. To podejście uznaję za ważne osiągnięcie pracy o charakterze nowatorskim.
3. Wykonanie sekwencji numerycznych symulacji z wykorzystaniem opracowanego modelu. Symulacje objęły pełny zestaw procesów, od spiekania dwóch cząstek a do symulacji całego cyklu wytwarzania spieku. Symulacje poszczególnych procesów posłużyły do identyfikacji modeli, a symulacja cyklu procesów do weryfikacji i walidacji modelu. Symulacja całego cyklu (prasowanie, spiekanie, odciążanie) jest ważnym osiągnięciem, które może być wykorzystane w projektowaniu i optymalizacji procesów spiekania.
4. Wykonanie obliczeń stanu naprężenia w skalach mikro i makro, co pozwoliło na ocenę podatności materiału na pękanie.
5. Wykonanie serii zaawansowanych badań doświadczalnych, obejmujących próby mechaniczne oraz fizyczną symulację procesów. Przeprowadzenie badań własności mechanicznych próbki spiekane na podstawie próby brazylijskiej.

Sumarycznie oceniam pracę w pełni pozytywnie. Nie mam poważniejszych zastrzeżeń merytorycznych do opisanego rozwiązania. W poprawionej wersji pracy wyeliminowane zostały nieścisłości związane z używaną terminologią oraz niedociągnięcia w opisie różnych zjawisk zachodzących w badanych procesach. Moje główne krytyczne lub może raczej dyskusyjne uwagi zawarte w pierwszej recenzji zostały uwzględnione przez Doktoranta lub wyjaśnione w odpowiedziach na recenzję. Prosiłbym aby w czasie publicznej rozprawy Doktorant ustosunkował się do następujących zagadnień:

1. W modelu styku cząstek w procesie prasowania pominięto część plastyczną. Prosiłbym o komentarz w czasie publicznej dyskusji nad rozprawą na ile to uproszczenie ma wpływ na dokładność modelu oraz o przedstawienie wyników dokumentujących zasadność pominięcia części plastycznej.
2. Czy w symulacjach w sekcjach 5.1.1 i 5.1.2 uwzględniono wpływ temperatury? W odpowiedzi na recenzję Doktorant wskazał lepkość jako parametr zależny od temperatury i mający wpływ na symulacje spiekania. Lepkość uzależnił od współczynników dyfuzji. Prosiłbym o wyjaśnienie, jak model zachowywałby się w warunkach zmiennej temperatury. Prosiłbym też o ściślejsze wyjaśnienie zależności (4.40), (4.81) i (4.83) mając na uwadze jednostki. Jaka lepkość jest we wzorze (4.39), a jaka we wzorze (4.40), kinematyczna czy dynamiczna? Jaka w konsekwencji jest wrażliwość modelu na temperaturę.
3. Zabrakło w pracy wniosku, w którym zostałyby ujęte problemy numeryczne, jakie pojawiały się przy opracowywaniu modelu. Niektóre z tych problemów Autor ujął w części zatytułowanej „Recommendations for future work”. Zestawienie w formie *capabilities/limitations of the model* byłoby wskazówką dla czytelnika pracy. Problemy związane z doбором schematu całkowania oraz analizą stabilności rozwiązania, a także ze skalowaniem parametrów, nie znalazły się we wnioskach. Brakuje też w pracy odniesienia się do kosztów obliczeń oraz ewentualnych możliwości obniżenia tych kosztów.

Podsumowując ogólną ocenę pracy stwierdzam, że Doktorant udowodnił dobre przygotowanie do prowadzenia oryginalnych badań naukowych w zakresie modelowania procesów przetwórstwa metali. Potwierdził On swoją wiedzę i bardzo dobre zrozumienie problemów w tym zakresie. Wykazał się biegłością w stosowaniu zaawansowanych metod modelowania numerycznego, a w szczególności metod identyfikacji parametrów materiałowych na potrzeby modelowania. Wymienione w pierwszej recenzji uwagi w dużej części mają charakter polemiczny i nie podważają faktu, że Autor samodzielnie rozwiązał istotny problem naukowy. Na większość uwag w pierwszej recenzji Autor udzielił odpowiedzi i dokonał poprawek lub uzupełnień. Stąd sumaryczna ocena pracy jest bardzo dobra.

4. OCENA DOROBKU NAUKOWEGO DOKTORANTA

Przedstawiony wraz z rozprawą dorobek naukowy Doktoranta obejmuje 11 publikacji w recenzowanych czasopismach naukowych, w tym 3 prace w czasopismach klasyfikowanych przez JCR. Ponadto Doktorant prezentował wyniki swoich badań na 2-ch konferencjach międzynarodowych i 3-ch konferencjach krajowych, a także w ramach referatów wygłaszanych na różnych seminariach i w czasie wizyt w innych Uniwersytetach. Doktorant przebywał na trzech krótkoterminowych stażach zagranicznych i uczestniczył w realizacji projektów badawczych. Był kierownikiem projektu NCN w ramach konkursu Preludium. W sumie dorobek naukowy Doktoranta oraz Jego aktywność i współpraca międzynarodowa zasługują na wysoką ocenę.

5. WNIOSEK KOŃCOWY

Podsumowując opinię należy stwierdzić, że Autor:

- Wykazał się umiejętnością prowadzenia badań naukowych obejmujących symulację procesów przetwórstwa materiałów i zastosował te umiejętności do rozwiązania bardzo skomplikowanego zagadnienia, jakim jest symulacja spiekania materiałów dwufazowych,
- Dla osiągnięcia tego celu zastosował opracowane własne rozwiązania w zakresie modelowania spiekania dwóch cząstek z różnych materiałów. Rozwiązanie jest nowatorskie i stanowi wkład w rozwój modelowania zjawisk zachodzących w procesach spiekania proszków.

Uwagi zawarte w pierwszej recenzji miały charakter dyskusyjny i nie wpływały na sumaryczną bardzo dobrą merytoryczną ocenę pracy. Uwagi te zostały uwzględnione przez Doktoranta lub wyjaśnione w odpowiedziach na recenzję. Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie naukowej mechanika. Praca potwierdza też umiejętność Doktoranta samodzielnego prowadzenia badań naukowych, spełnia zatem w pełni wymagania zawarte w odpowiedniej ustawie. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Szymona Nosewicza do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Wnioskuje również o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Szymona Nosewicza. Jako uzasadnienie propozycji wyróżnienia rozprawy podaję:

- Praca dotyczy bardzo ważnego i trudnego zagadnienia, jakim jest modelowanie spiekania materiałów.
- Opracowany model jest nowatorski. Nie jest mi znane w literaturze rozwiązanie tego typu. Opracowany model dostarcza nowych informacji o przebiegu procesów spiekania.
- Doktorant osiągnął istotny zarówno z teoretycznego jak i z praktycznego punktu widzenia cel, jakim było opracowanie modelu o większych możliwościach obliczeniowych przy zachowaniu niskich kosztów obliczeń. Na podstawie przeprowadzonych testów numerycznych wykazał prawidłowość działania modelu.
- Dla osiągnięcia tego celu Doktorant opracował szereg autorskich rozwiązań w zakresie modelowania spiekania dwóch cząstek oraz identyfikacji parametrów materiałowych. Szczególnie to drugie zagadnienie związane z prawidłowym wyznaczeniem parametrów modelu jest istotne dla dokładności i niezawodności tego modelu.





Kraków, 30.09.2015.

Prof. Maciej Pietrzyk

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Szymona Nosewicza pt. "Discrete element modeling of powder metallurgy processes".

Zlecenie na opracowanie recenzji otrzymałem od Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN pismem z dnia 17 lipca 2015 roku. Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr inż. Szymona Nosewicza przedstawiam poniższą opinię.

1. PRZEDMIOT OCENY

Przedmiotem oceny jest praca doktorska napisana w języku angielskim składająca się ze spisu treści, wstępu, 5 rozdziałów zasadniczych oraz wniosków, spisu literatury i trzech aneksów, zawierająca 109 rysunków i 18 tablic. Spis literatury obejmuje 240 pozycji. W spisie literatury zawarto znane mi najważniejsze prace związane z tematyką rozprawy. Prace uzupełniają streszczenia w języku polskim i angielskim.

2. OGÓLNA OCENA PRACY

Wiele gałęzi przemysłu, głównie lotniczy i motoryzacyjny ale także szereg innych, ciągle poszukuje materiałów o specjalnych, wysokich własnościach mechanicznych. Takie cechy materiałów jak wysoki iloraz wytrzymałości i masy lub połączenie dobrych własności wytrzymałościowych i plastycznych są wymagane przez przemysł. W wielu laboratoriach naukowych prowadzone są badania nad otrzymywaniem nowych materiałów spełniających te wysokie wymagania. Materiały kompozytowe odgrywają tutaj kluczową rolę. Są to zarówno kompozyty uzyskiwane przez połączenie różnych materiałów jak i przez wytworzenie różnych faz w jednym materiale, np. stale wielofazowe. Projektowanie takich materiałów wymaga kosztownych prób doświadczalnych i numeryczne modelowanie jest narzędziem wspomagającym badania i pozwalającym często na znaczne obniżenie ich kosztów. W tym aspekcie uważam wybór tematyki pracy za w pełni uzasadniony.

Tytuł rozprawy odpowiada jej treści. Autor zaplanował i konsekwentnie zrealizował sekwencję badań doświadczalnych i rozważań teoretycznych zmierzających do zbudowania modelu opisującego procesy w metalurgii proszków. Problem modelowania przetwórstwa materiałów proszkowych jest w centrum zainteresowania naukowców od wielu lat. Rozwój modeli jest stymulowany wzrostem mocy obliczeniowej komputerów i obecnie dostępnych jest szereg modeli od konwencjonalnych analityczno-empirycznych rozwiązań po współczesne nowoczesne metody numeryczne. W rozdziale 1 rozprawy Autor przedstawił skrócony ale bogaty w informacje przegląd najnowszych modeli, grupując je ze względu na sposób opisu materiału (proszku). Pewna niekonsekwencja pojawia się na stroni 9 gdzie w wierszach 3-4 Doktorant pisze, że omówione modele nie uwzględniały dodatkowych zewnętrznych sił. Wcześniej cytowane są prace [80,130,172, 233], w których modelowano spiekanie pod ciśnieniem. W tej grupie wymienić można pracę Ludinga i in. [130], w której badano poprzez

modelowanie wpływ sił zewnętrznych i czasu spiekania na własności spieku. Zabrakło też podsumowania przeprowadzonej analizy modeli, która pokazywałaby słabe strony tych modeli i umiejscawiała obecną pracę w tych obszarach. Sformułowane cele pracy jako: i) opracowanie własnego modelu dyskretnego, ii) badania doświadczalne spiekania oraz iii) weryfikacja i walidacja modelu są przejrzyste. Brak jest jednak w tym miejscu podania jakie cele modelu wyróżniają go od dostępnych w literaturze i co w tezie pracy oznacza „oryginalny model”. Dopiero z dalszej części rozprawy można wnioskować, że oryginalnością jest zastosowanie cieplno-lepko-sprężystego modelu materiału.

W rozdziale 2 Autor podaje podstawowe informacje o procesie spiekania. W pracy zawarto zwięzły opis mechanizmów występujących w tym procesie oraz ich termodynamiczne podstawy, przede wszystkim siłę pędą spiekania. Ten rozdział potwierdza wiedzę Autora o badanym procesie i umiejętność uwypuklenia kluczowych aspektów ważnych dla modelowania. Pewnym mankamentem jest brak ujęcia w analizie wpływu sił zewnętrznych. Nie zmienia to faktu że materiał zawarty w rozdziale 2 ma istotne znaczenie a jednym z wniosków jest uwypuklenie trudności związanych z uwzględnieniem w modelach w sposób jawny wszystkich mechanizmów odpowiedzialnych za proces spiekania. Na podstawie przeprowadzonej analizy Doktorant w dalszej części pracy zaproponował szereg rozwiązań, które pozwoliły Mu opracować efektywny i dokładny dyskretny model procesu spiekania.

W rozdziale 3 rozprawy opisano doświadczenia fizyczne przeprowadzone przez Doktoranta. Jest to bardzo wartościowa część pracy. Badania zostały zaplanowane kompleksowo mając na uwadze cel, jakim było dostarczenie danych do identyfikacji i weryfikacji modelu. Badania objęły przygotowanie materiału wsadowego i wyznaczenie jego własności, a następnie przeprowadzenie fizycznych symulacji procesu spiekania. Wykonane elementy poddano badaniom własności mechanicznych i mikrostruktury. Zastosowano specyficzne metody badawcze adekwatne do własności badanych wyrobów, np. próba brazylijska. Przeprowadzane badania dostarczyły danych niezbędnych do budowy modelu konstytutywnego, takich jak własności materiału, zmiana gęstości w czasie spiekania i zależność własności mechanicznych od gęstości. Pozytywnie oceniam tą część pracy i całość badań doświadczalnych (fizycznych) uznaję za znaczące osiągnięcie Doktoranta.

Głównymi celami pracy są budowa i identyfikacja modelu numerycznego procesu spiekania, opisującego ten proces w różnych skalach wymiarowych. Autor stara się osiągnąć ten cel w kilku etapach. W pierwszym przedstawił założenia przyjęte przy tworzeniu modelu, które są poprawne. Następnie zamieszczone zostały podstawowe równania modelu, obejmujące równania ruchu, opis styku cząstek i opis spiekania dwóch cząstek. Model reologiczny przedstawiono w dwóch wariantach, model Kelvina-Voigta dla opisu zachowania się ciała stałego i model Maxwella dla opisu płynięcia materiału. Wynikiem jest zależność opisująca względną prędkość cząstek z uwzględnieniem zjawisk cieplnych, sprężystych i lepkich. Dalszy opis modelu numerycznego zawiera zastosowany schemat całkowania oraz analizę stabilności rozwiązania, a także opis skalowania parametrów dla obniżenia kosztów obliczeń. W identyfikacji fizycznych parametrów modelu takich jak współczynnik dyfuzji czy współczynniki modelu cieplno-lepko-sprężystego w pierwszym podejściu wykorzystano dane dostępne w literaturze. W dalszej części pracy identyfikację przeprowadzono na podstawie badań doświadczalnych opisanych w rozdziale 2.

Opracowany przez Doktoranta model wykorzystano w rozdziale 5 do numerycznej symulacji procesów metalurgii proszków. Ta część pracy jest logicznie zaplanowaną sekwencją numerycznych symulacji, pozwalających kolejno na identyfikację modelu oraz na weryfikację i ocenę poszczególnych składowych modelu. W konsekwencji Autor opracował efektywny model dyskretny cyklu spiekania, który zastosował do symulacji całego cyklu oraz poszcze-

gólnych procesów w różnych warunkach. Symulacje spiekania dwóch cząstek posłużyły do oceny poprawności przyjętego rozwinięcia modelu o część sprężystą. Porównanie wyników wykazało prawidłowość działania rozszerzonego modelu, a korzyścią z jego zastosowania było znaczne skrócenie czasów obliczeń poprzez wydłużenie kroku czasowego. W tej części pracy oceniono też wpływ ciśnienia na szybkość spiekania.

W drugiej części rozdziału 5 opisano symulacje cyklu procesów składających się na cały proces spiekania. Symulacje wykonano dla materiałów jednofazowych i materiału dwufazowego. Symulacje dla materiałów jednofazowych w połączeniu z wynikami symulacji fizycznych posłużyły do identyfikacji modeli materiału. Symulacje dla materiału dwufazowego posłużyły do dalszej identyfikacji, a następnie weryfikacji i walidacji modelu. Identyfikacja objęła parametry modelu styku dwóch cząstek z różnych materiałów. Walidacja obejmowała symulacje cyklu wytwarzania spieku wykonane dla różnych temperatur i różnych ciśnień. Weryfikacja obejmowała porównanie zmierzonych i obliczonych zmian gęstości w czasie spiekania. W tych ostatnich testach otrzymano większe rozbieżności między pomiarami i obliczeniami. Doktorant przypisuje te rozbieżności przyjęciu kulistych cząstek, podczas gdy badania doświadczalne wykazały że kształt cząstek odbiega od kulistego. Założenie kulistego kształtu spowodowało przeszacowanie wzrostu gęstości. Wskazana byłaby bardziej dogłębna analiza przyczyn mniejszej dokładności modelu w tych symulacjach. Niezależnie od tych rozbieżności między pomiarami i obliczeniami uważam, że Doktorant opracował poprawny model zawierający nowatorskie aspekty w stosunku do modeli opublikowanych w literaturze.

Rozdział 6 pracy zawiera opis zastosowania modelu do wyznaczenia naprężeń w spiekającym materiale. Te obliczenia dostarczyły informacji, które mogą być pomocne w ocenie tendencji do pęknięcia cząstek w różnych warunkach prowadzenia procesu.

3. UWAGI SZCZEGÓŁOWE

Wiele gałęzi przemysłu, głównie lotniczy i motoryzacyjny ale także szereg innych, ciągle poszukuje materiałów o specjalnych, wysokich własnościach mechanicznych. Takie cechy materiałów jak wysoki iloraz wytrzymałości i masy lub połączenie dobrych własności wytrzymałościowych i plastycznych są wymagane przez przemysł. W wielu laboratoriach naukowych prowadzone są badania nad otrzymywaniem nowych materiałów spełniających te wysokie wymagania. Materiały kompozytowe odgrywają tutaj kluczową rolę. Są to zarówno kompozyty uzyskiwane przez połączenie różnych materiałów jak i przez wytworzenie różnych faz w jednym materiale, np. stale wielofazowe. Projektowanie takich materiałów wymaga kosztownych prób doświadczalnych i numeryczne modelowanie jest narzędziem wspomagającym badania i pozwalającym często na znaczne obniżenie ich kosztów. W tym aspekcie uważam wybór tematyki pracy za w pełni uzasadniony.

W pracy zawarto obszerny, uzyskany na drodze dużego nakładu pracy, materiał dotyczący trudnego problemu teoretycznego opisu zachowania się proszku w czasie spiekania. Można wyróżnić szereg szczegółowych osiągnięć Autora zawartych w opiniowanej pracy, takich jak:

1. Opracowanie, identyfikacja i weryfikacja autorskiego modelu procesu spiekania. Model wykorzystuje nowoczesną metodę elementów dyskretnych i zawiera nowe aspekty w stosunku do istniejących modeli tego procesu. Opracowany model lepko-sprężysty charakteryzuje się znacznie krótszymi czasami obliczeń niż model idealnie lepki. Opis modelu przeprowadzono z zastosowaniem formalizmu matematycznego, a numeryczną implementacją wykonano z zachowaniem niezbędnych działań obejmujących analizę stabilności rozwiązania oraz ocenę zbieżności i kosztów obliczeń.
2. Opracowanie algorytmu i programu dla generowania początkowej struktury spieku zarówno dla materiału jednofazowego jak i 2-fazowego. Struktura została wygenerowana z

wykorzystaniem dynamicznego rozwiązania metodą elementów dyskretnych. To podejście uznaję za ważne osiągnięcie pracy o charakterze nowatorskim.

3. Wykonanie sekwencji numerycznych symulacji z wykorzystaniem opracowanego modelu. Symulacje objęły pełny zestaw procesów, od spiekania dwóch cząstek aż do symulacji całego cyklu wytwarzania spieku. Symulacje poszczególnych procesów dostarczyły danych do identyfikacji modeli, a symulacja cyklu procesów dostarczyła danych do weryfikacji i walidacji modelu. Symulacja całego cyklu wytwarzania spieku (pracowanie, spiekanie, odciążanie) jest nowatorskim osiągnięciem Autora, które może znaleźć praktyczne zastosowanie w projektowaniu i optymalizacji procesów spiekania.
4. Wykonanie obliczeń stanu naprężenia w skalach mikro i makro, co pozwoliło na ocenę podatności materiału na pękanie.
5. Wykonanie serii zaawansowanych badań doświadczalnych, obejmujących próby mechaniczne oraz fizyczną symulację procesów. Przeprowadzenie badań własności mechanicznych próbki spiekane na podstawie próby brazylijskiej.

Sumarycznie oceniam pracę w pełni pozytywnie. Nie mam poważniejszych zastrzeżeń merytorycznych do opisanego rozwiązania. Moje główne krytyczne lub może raczej dyskusyjne uwagi są następujące:

1. W części dotyczącej metalurgii proszków (sekcja 1.1) zbyt powierzchownie potraktowano tą metodę wytwarzania wyrobów. Zabrakło kilku zdań oceny możliwości praktycznego zastosowania tych procesów w aspekcie zapotrzebowania na wyroby z proszków i kosztów ich wytwarzania.
2. Nie jest jasne, czy w symulacjach opisanych w sekcjach 5.1.1 i 5.1.2 uwzględniono wpływ temperatury.
3. W modelu styku cząstek w procesie prasowania pominięto część plastyczną. Wskazany byłby komentarz, na ile to uproszczenie ma wpływ na dokładność modelu.
4. W części opisującej badania doświadczalne (rozdział 2) podano szereg wyników znajdujących się w opublikowanych wcześniej pracach współautorstwa Doktoranta [27,28]. Często brak jest odwołania do tych publikacji i nie jest jasne, które wyniki zostały zaczerpnięte z tych publikacji. Ponadto niektóre wyniki badań doświadczalnych znalazły się w rozdziale 5 z odwołaniem do [27]. W sumie utrudnia to wyodrębnienie samodzielnego osiągnięcia Doktoranta w części doświadczalnej.
5. Wnioski z pracy to wyliczenie co zostało w pracy zrobione. Zabrakło wniosku zawierającego najlepsze parametry procesu, jakie wynikają z symulacji. Zabrakło też wniosku, w którym zostałyby ujęte problemy numeryczne, jakie pojawiały się przy opracowywaniu modelu. Niektóre z tych problemów Autor ujął w części zatytułowanej „Recommendations for future work”.
6. Zbyt enigmatycznie potraktowane jest modelowanie wieloskalowe w części literaturowej (rys. 1.5). Odnosi się to też do części rozdziału 6, w której opisano naprężenia w skalach mikro i makro. Brakuje w pracy umiejscowienia modelu Autora w klasyfikacji modelowania wieloskalowego. Ponownie, jak to miało miejsce w poprzedniej uwadze, Autor odniósł się do tego problemu dopiero w ostatnim punkcie w części zatytułowanej „Recommendations for future work”.
7. W opisie na str. 58 człon F_n^T widoczny na rys. 4.9 włączony jest do części sprężystej F_n^e , która jest wydzielona na rysunku.

Podsumowując ogólną ocenę pracy stwierdzam, że Doktorant udowodnił dobre przygotowanie do prowadzenia oryginalnych badań naukowych w zakresie modelowania procesów przetwórstwa metali. Potwierdził On swoją wiedzę i bardzo dobre zrozumienie problemów w tym zakresie. Wykazał się biegłością w stosowaniu zaawansowanych metod modelowania numerycznego, a w szczególności metod identyfikacji parametrów materiałowych na potrze-

by modelowania. Wymienione w recenzji uwagi w dużej części mają charakter polemiczny i nie podważają faktu, że Autor samodzielnie rozwiązał istotny problem naukowy. Stąd sumaryczna ocena pracy jest bardzo dobra.

4. OCENA DOROBKU NAUKOWEGO DOKTORANTA

Przedstawiony wraz z rozprawą dorobek naukowy Doktoranta obejmuje 11 publikacji w recenzowanych czasopismach naukowych, w tym 3 prace w czasopismach klasyfikowanych przez JCR. Ponadto Doktorant prezentował wyniki swoich badań na 2-ch konferencjach międzynarodowych i 3-ch konferencjach krajowych, a także w ramach referatów wygłaszanych na różnych seminariach i w czasie wizyt w innych Uniwersytetach. Doktorant przebywał na trzech krótkoterminowych stażach zagranicznych i uczestniczył w realizacji projektów badawczych. Był kierownikiem projektu NCN w ramach konkursu Preludium. W sumie dorobek naukowy Doktoranta oraz Jego aktywność i współpraca międzynarodowa zasługują na wysoką ocenę.

5. WNIOSEK KOŃCOWY

Podsumowując opinię należy stwierdzić, że Autor:

- Wykazał się umiejętnością prowadzenia badań naukowych obejmujących symulację procesów przetwórstwa materiałów i zastosował te umiejętności do rozwiązania bardzo skomplikowanego zagadnienia, jakim jest symulacja spiekania materiałów dwufazowych,
- Dla osiągnięcia tego celu zastosował opracowane własne rozwiązania w zakresie modelowania spiekania dwóch cząstek z różnych materiałów.

Zawarte w recenzji uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na sumaryczną bardzo dobrą merytoryczną ocenę pracy. Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie naukowej mechanika. Praca potwierdza też umiejętność Doktoranta samodzielnego prowadzenia badań naukowych, spełnia zatem w pełni wymagania zawarte w odpowiedniej ustawie. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Szymona Nosewicza do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Wnioskuje również o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Szymona Nosewicza. Jako uzasadnienie propozycji wyróżnienia rozprawy podaję:

- Praca dotyczy bardzo ważnego i trudnego zagadnienia, jakim jest modelowanie spiekania materiałów.
- Doktorant osiągnął istotny zarówno z teoretycznego jak i z praktycznego punktu widzenia cel, jakim było opracowanie modelu o większych możliwościach obliczeniowych przy zachowaniu niskich kosztów obliczeń. Na podstawie przeprowadzonych testów numerycznych wykazał prawidłowość działania modelu.
- Dla osiągnięcia tego celu Doktorant opracował szereg autorskich rozwiązań w zakresie modelowania spiekania dwóch cząstek oraz identyfikacji parametrów materiałowych.



