

Gliwice, 23.12.2014 r.

Dr hab. inż. Piotr Fedeliński  
Profesor nzw. w Politechnice Śląskiej  
Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej  
Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Politechnika Śląska  
44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18A  
Tel. 32 2371635, Fax: 32 2371282  
E-mail: Piotr.Fedelinski@polsl.pl

## Recenzja

**rozprawy doktorskiej mgra inż. Marcina Nowaka**  
**Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN**  
**pt. „Analiza deformacji i zniszczenia struktur komórkowych w zastosowaniu**  
**do symulacji procesu infiltracji pianki korundowej ciekłym metalem”**  
**Promotor: dr hab. inż. Zdzisław Nowak**

### 1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Kompozyty metalowo-ceramiczne należą do nowoczesnych materiałów inżynierskich, które znajdują zastosowanie np. w przemyśle lotniczym, samochodowym i innych. Do takich kompozytów należą kompozyty o przenikających się fazach (ang. *interpenetrating phase composites*), które otrzymuje się poprzez nasączenie pianki ceramicznej ciekłym metalem. Jednym z materiałów ceramicznych stosowanych w takich kompozytach są pianki korundowe, które dzięki dużej porowatości charakteryzują się wysokim stosunkiem wytrzymałości do gęstości, wysoką temperaturą topnienia, odpornością na działanie substancji chemicznych i małą przewodnością cieplną. Połączenie materiału ceramicznego z metalowym pozwala na uzyskanie kompozytu ciągliwego o wysokiej temperaturze topnienia i dużej odporności na ścieranie.

W pracy rozpatrywano pianki korundowe otrzymywane metodą żelowania spienionej zawiesiny. Tego rodzaju materiały posiadają bardzo dużą porowatość, pory mają formę przenikających się pustek sferycznych (porowatość otwarta), powodując, że materiał jest przepuszczalny dla ciekłych metali. Materiał cechuje się wysoką porowatością od 60 do 90 %. Ze względu na losowe rozmieszczenie pustek materiał można traktować w skali makroskopowej jako izotropowy.

W trakcie wytwarzania kompozytu metaliczno-ceramicznego o przenikających się fazach poprzez infiltrację pianki korundowej ciekłym metalem powstają duże naprężenia w piance mogące prowadzić do jej uszkodzenia. Wtłaczanie ciekłego metalu do pianki wymaga wywarcia nacisku na metal, który obciąża piankę. Wartość tego nacisku jest ograniczona wytrzymałością pianki na ściskanie.

Celem pracy jest analiza doświadczalna i komputerowa stanu wytężenia pianki w procesie infiltracji ciekłym metalem. Doktorant zaproponował trzy przestrzenne modele komputerowe MES pianki korundowej: model utworzony na podstawie zdjęć mikrotomograficznych, model komórki jednostkowej struktury periodycznej i model o losowych pustkach w piance. Przyjęto model zniszczenia materiału pianki. Wyniki analizy komputerowej własności mechanicznych pianki korundowej porównano z wynikami badań doświadczalnych.

Określono wielkość nacisku na piankę w czasie procesu infiltracji, wykorzystując symulację komputerową przepływu metalu przez pory.

Badania naukowe realizowano w ramach projektu „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym” w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka.

Ze względu na tematykę pracy rozprawa doktorska może być zakwalifikowana do dyscypliny mechanika.

## 2. Przegląd treści rozprawy

Praca składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim, wykazu ważniejszych oznaczeń, siedmiu rozdziałów, trzech dodatków, wykazu literatury i skorowidza nazw. Rozprawa napisana jest na 110 stronach.

W rozdziale 1. opisano zastosowanie i własności kompozytów metaliczno-ceramicznych o przenikających się fazach.

Rozdział 2. przedstawia cel, zakres prowadzonych badań i tezę rozprawy, która brzmi:

*„Podczas procesu infiltracji pianki ciekłym metalem możliwe jest występowanie uszkodzeń spowodowane lokalnym pojawieniem się naprężeń rozciągających. Tego rodzaju naprężenia powodują powstawanie lokalnych pęknięć w ściankach komórek pianki. Korund jako materiał kruchy ma bardzo małą wytrzymałość na rozciąganie w stosunku do wytrzymałości na ściskanie, dlatego nawet bardzo małe odkształcenia powodują stopniowe pojawienie się uszkodzeń w piance.”*

W rozdziale 3. na podstawie studiów literaturowych opisano rzeczywistą strukturę pianki korundowej, modele numeryczne wykorzystujące mikrotomografię komputerową, modele periodyczne i modele losowe. Podano równania określające własności sprężyste i wytrzymałościowe pianki, a także zmiany ciśnienia przy przepływie cieczy przez piankę. Omówiono literaturę dotyczącą procesu infiltracji pianki ciekłym metalem.

W rozdziale 4. przedstawiono rzeczywiste struktury otwarte i zamknięte pianki korundowej oraz parametry, które służą do ich opisu. Omówiono zaproponowane modele komputerowe struktur. Badania struktury pianki korundowej przeprowadzono na mikrotomografii komputerowej w IPPT PAN. Zbadano wpływ wielkości analizowanego obszaru na wyznaczoną porowatość. Opracowano program do detekcji obszarów kołowych i określania ich wymiarów. Wyznaczono rozkłady gęstości prawdopodobieństwa promieni pustek i okienek oraz grubości ścianek pianki. Na podstawie wielu zdjęć tomograficznych pianki utworzono przestrzenny obraz struktury. Badano wpływ rozdzielczości na jakość obrazu struktury. Zaproponowano komórki periodyczne zawierające pustki o tych samych rozmiarach i trzech różnych rozmieszczeniach w komórce. Określono porowatość materiału na podstawie wymiaru pustek i komórki jednostkowej. Zbadano wpływ wymiaru pustki na rodzaj porowatości: zamkniętą, otwartą i nieciągłą. Podano algorytm tworzenia komórki periodycznej o zadanej porowatości. Przedstawiono generację pustek losowych.

W rozdziale 5. opisano wyniki badań doświadczalnych próbek korundowych na ściskanie. Rejestrowano zależność naprężenia od odkształcenia dla różnej porowatości próbek. Na wykresach rozrózniono trzy charakterystyczne strefy. Wyznaczona wytrzymałość na ściskanie jest zgodna z wynikami innych autorów. Przedstawiono model konstytutywny litego korundu. Wyznaczono zastępcze moduły Younga pianki wykorzystując modele oparte na zdjęciach tomograficznych, modele periodyczne i losowe. Obliczenia wykonano dla różnej porowatości, a wyniki porównano z danymi literaturowymi. Określono wytrzymałość na ściskanie wykorzystując model losowy i periodyczny. Przedstawiono analizę przepływu cieczy za pomocą metody elementów skończonych przez struktury periodyczne. Wyznaczono spadki ciśnienia cieczy przy przepływie przez różne struktury i dla różnej porowatości.

W rozdziale 6. przedstawiono zagadnienie infiltracji pianki korundowej ciekłym metalem. W pracy analizowano stan pianki w pierwszej fazie infiltracji, kiedy górna powierzchnia pianki jest obciążana ciśnieniem ciekłego metalu. Rozpatrywano uproszczony model przepływu ciekłego metalu przez dwa pory, które odpowiadają porowatości 90 %. Zagadnienie potraktowano jako osiowosymetryczne. Obliczenia wykonano dla dwóch różnych dyskretyzacji i dwóch kątów zwilżenia. Wyznaczono zależność ciśnienia wywieranego na metal w funkcji czasu. Stwierdzono mały wpływ prędkości infiltracji i dyskretyzacji na zmiany ciśnienia. Porównano wytrzymałość na ściskanie z ciśnieniem potrzebnym do infiltracji dla różnego napięcia powierzchniowego.

W rozdziale 7. podsumowano przeprowadzone badania, określono oryginalne elementy pracy i wskazano dalsze kierunki badań.

### 3. Ocena merytoryczna rozprawy

Rozprawa doktorska dotyczy modelowania komputerowego nowoczesnych materiałów, które ma na celu ocenę ich własności wytrzymałościowych i możliwości wytworzenia. Rozpatrywana problematyka badawcza jest zgodna ze współczesnymi kierunkami rozwoju mechaniki komputerowej. Modelowanie komputerowe materiałów na poziomie mikroskopowym stanowi uzupełnienie badań doświadczalnych i dostarcza dodatkowych informacji o własnościach materiałów, które są ważne w czasie ich wytwarzania i eksploatacji. Doktorant opracował różne metody generowania struktur piankowych i szczegółowo przedstawił je w rozprawie. Porównał wyznaczone własności wytrzymałościowe opracowaną metodą komputerową z własnościami określonymi doświadczalnie. Określił naciski na piankę w czasie infiltracji ciekłym metalem metodą analityczną i komputerową. Obliczenia wykonane dla różnych struktur pianki pozwalają na wyznaczenie porowatości, przy których może dochodzić do zniszczenia pianki w czasie infiltracji. Zakres przeprowadzonych badań jest obszerny i obejmuje: modelowanie geometrii materiału porowatego, obliczenia metodą elementów skończonych wytrzymałości pianki i przepływu ciekłego metalu przez piankę oraz badania tomograficzne geometrii pianek i badania doświadczalne wytrzymałości na ściskanie. Doktorant korzystał z najnowszych pozycji literaturowych dotyczących modelowania pianki korundowej i procesu infiltracji.

Do niedociągnięć i elementów dyskusyjnych recenzowanej pracy można zaliczyć:

1. Teza pracy nie odpowiada badaniom, które zostały przeprowadzone w ramach realizacji rozprawy doktorskiej. W tezie Doktorant stwierdza, że w trakcie procesu infiltracji może dochodzić do uszkodzenia pianki korundowej spowodowanej małą wytrzymałością materiału na rozciąganie. Do wykazania takiego zjawiska wystarczyłoby przeprowadzenie badań doświadczalnych. Natomiast w rozprawie Doktorant starał się wykazać, że zaproponowana metoda komputerowa modelowania pianki korundowej i przepływu ciekłego metalu w piance pozwala na określenie wyężenia materiału w procesie infiltracji, które jest zgodne z wynikami badań doświadczalnych.
2. W rozdziale 5.4 nie podano własności cieczy. Wyznaczony spadek ciśnienia nie jest wykorzystywany w dalszych obliczeniach numerycznych.
3. Z symulacji numerycznych infiltracji pianki przedstawionych w Rozdziale 6.2 wynika, że ciśnienie gwałtownie zmniejsza się, a w przypadku małego kąta zwilżenia ma nawet wartości ujemne. Czy przedstawione wyniki są zgodne z wynikami badań doświadczalnych?
4. Do określenia maksymalnego ciśnienia wywieranego w trakcie procesu infiltracji i oceny wytrzymałości pianki przedstawionych w rozdziale 6.3 wykorzystano równanie (6.2). Nie

korzystano z wyników obliczeń numerycznych. Praca nie zawiera porównania wyników obliczeń analitycznych i numerycznych maksymalnego ciśnienia.

5. Czy wyznaczone zakresy porowatości, dla których może dochodzić do uszkodzenia w czasie infiltracji są zgodne w wynikami doświadczalnymi ?
6. W pracy rozpatrywano pierwszą fazę procesu infiltracji, kiedy ciekły metal wywiera nacisk na górną powierzchnię pianki. Czy dochodzi do uszkodzenia pianki w czasie wpływania metalu do porów pianki? W czasie tego procesu następuje nierównomierne wypełnianie porów ze względu na ich różną geometrię, blokowanie przepływu przez zamknięte pory, itp.?
7. Wśród dalszych kierunków badań można wymienić badanie własności wytworzonego kompozytu metalowo-ceramicznego o przenikających się fazach.

Rozprawa doktorska jest bardzo starannie opracowana, jednakże Doktorant nie ustrzegł się błędów redakcyjnych:

1. W streszczeniu napisano: „*Opracowany został także model materiałowy zniszczenia litego korundu uwzględniający wpływ różnicy wytrzymałości i powstawanie mikrouszkodzeń.*” Nie podano o jaką różnicę wytrzymałości chodzi.
2. Streszczenie w języku angielskim nie odpowiada streszczeniu w języku polskim.
3. W celach pracy na str. 16 wymieniono „*badania eksperymentalne własności mechanicznych pianek korundowych o różnej porowatości (testy ściskania i rozciągania)*”. W ramach pracy przeprowadzono wyłącznie badania na ściskanie.
4. Na rys. 4.7 nie podano w jakich jednostkach wyrażane są wymiary pustek.
5. Podpis pod rys. 4.22: „*a) kule nie zachodzą na siebie, promień  $r_c > r_k$ , b) kule zachodzą na siebie, promień  $r_c < r_k$* ” Chyba powinny być przeciwne zależności.
6. Opisy osi zbyt małymi literami, np. rys. 5.7.
7. Podrozdział 5.3.1. „*Geometria struktury pianki korundowej*” powinien być umieszczony w rozdziale 4. „*Modelowanie geometryczne struktury pianki korundowej*”.
8. Podrozdział 5.4. „*Symulacje przepływu cieczy*” powinien być umieszczony w podrozdziale 6.2 „*Symulacje numeryczne procesu infiltracji*”.
9. Wymiary elementów skończonych na rys. 5.13 nie odpowiadają wymiarom podanym w tabeli 5.5.
10. Tabele 5.5, 5.6 i 5.7 są identyczne.
11. Podpis pod tabelą 5.7 „*... przedstawionych na Rys. 5.14.*” powinno być „*...przedstawionych na rys. 5.15.*”
12. Co oznacza wielkość  $e_s$  na rys. 5.16, 5.17 i 5.18 ?
13. Poniżej równania (5.5) - wielkości  $k_c$  i  $k_t$  nie ma w równaniu (5.5).
14. Poniżej równania (5.7) „*gdzie parametr  $k$  wyraża stosunek ...*”. Wcześniej wymiar  $k$  określał przenikanie się pustek.
15. Rys. 5.35 – nie podano jednostek  $\Delta p$ . Podpis pod rysunkiem „*... dla dwóch typów komórek ...*”. Powinno być „*... dla trzech typów komórek ...*”

16. Str. 84 „Porównanie wpływu prędkości przedstawiono na Rys. 6.5.” Powinno być „...na rys. 6.6.”. Nie podano kąta zwilżenia dla wyników na rys. 6.6 i 6.7.
17. W dodatku B umieszczono kody źródłowe modelu litego korundu z uszkodzeniem i symulacji CFD dla struktur periodycznych. Nie podano schematu blokowego programów i objaśnienia znaczenia stosowanych zmiennych.

#### 4. Wnioski końcowe

Przedstawiona przez Doktoranta w rozprawie metoda modelowania geometrii i własności mechanicznych pianki korundowej pozwala na określenie jej wytrzymałości na ściskanie, która jest zgodna z wynikami badań doświadczalnych. Opracowana metoda analizy przepływu ciekłego metalu przez pory umożliwia wyznaczenie nacisku metalu na piankę korundową. Zaproponowana w pracy doktorskiej metoda służąca do badania wytrzymałości pianki korundowej w czasie infiltracji ciekłym metalem jest oryginalnym osiągnięciem naukowym.

Temat rozprawy wymagał od Doktoranta wiedzy z zakresu mechaniki ciała stałego, metod numerycznych, metody elementów skończonych i metod doświadczalnych.

Krytyczne uwagi, przedstawione w punkcie 3. niniejszej recenzji, nie umniejszają wartości naukowej rozprawy.

Podsumowując recenzję, stwierdzam, że rozprawa doktorska przedstawiona przez mgra inż. Marcina Nowaka spełnia warunki określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595) i może stanowić podstawę do nadania stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie mechanika. Wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony przed Radą Naukową Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie.

