

Białystok, 20.11.2017 r.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Seweryn
profesor zwyczajny
Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej
Wydział Mechaniczny Politechniki Białostockiej
e-mail: a.seweryn@pb.edu.pl

RECENZJA

**pracy doktorskiej autorstwa mgr inż. Zuzanny Agnieszki Poniżnik
pt. „*Modelling of effective properties and fracture of metal-ceramic
interpenetrating phase composites.*”**

Podstawa opracowania opinii: pismo Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk dr hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego (profesora nadzwyczajnego IPPT PAN) z dnia 10.07.2017 roku.

1. Charakterystyka i ogólna analiza pracy

Tematyka badań zaprezentowanych w rozprawie doktorskiej autorstwa mgr inż. Zuzanny Agnieszki Poniżnik dotyczy metod analitycznych i numerycznych wyznaczania makroskopowych właściwości sprężystych i termicznych oraz modelowania procesów deformacji oraz pęknięcia kompozytów metalowo-ceramicznych o wzajemnie przenikających się fazach (Interpenetrating Phase Composites – w skrócie IPC). Najczęściej osnowę ceramiczną takiego kompozytu stanowi tlenek glinu, a wypełnienie metaliczne – miedź lub aluminium. Badania te, moim zdaniem, mają duże znaczenie poznawcze, a także aplikacyjne. Związane jest to z bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi (wysoka wytrzymałość i odporność na pęknięcie), termicznymi (żaroodporność i wysoka przewodność cieplna) oraz użytkowymi (wysoka odporność na ścieranie i na korozję) materiałów IPC, a przez to coraz szerszym ich zastosowaniem w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym, energetycznym oraz elektronicznym.

Autorka rozprawy podjęła trud wzbogacenia dotychczasowej wiedzy na temat mechaniki kompozytów metalowo-ceramicznych o wzajemnie przenikających się fazach, a w szczególności ich właściwościach sprężystych i termicznych oraz procesów ich odkształcania i pęknięcia. Zagadnienia te obarczone są dużym stopniem trudności ze względu na wysoką niejednorodność materiału oraz skomplikowaną morfologię faz, a

także ich zdecydowanie różnymi właściwościami (ceramika – faza krucha/metal – faza ciągliwa). Powoduje to znaczne spiętrzenie naprężeń na granicy faz, tym bardziej mogą tam występować nieciągłości materiału (szczeliny, małe pory), bardzo trudne do wyznaczenia na podstawie eksperymentu, a często decydujące o sposobie pękania kompozytu.

Rozprawa doktorska mgr inż. Zuzanny Agnieszki Poniżnik obejmuje 177 stron. Można w niej wyróżnić 7 rozdziałów, załącznik, wykaz ważniejszych oznaczeń i spis literatury, streszczenia w języku polskim i angielskim.

Pierwszy rozdział pracy doktorskiej (6 stron) poświęcono ogólnemu przybliżeniu tematyki przedstawionej w pracy, a w szczególności właściwościom mechanicznym i termicznym kompozytów metalowo-ceramicznych o wzajemnie przenikających się fazach. Wskazano motywację prowadzonych badań oraz ich umiejscowienie względem aktualnego stanu wiedzy. W skrócie opisano zawartość poszczególnych rozdziałów pracy.

W **drugim rozdziale** pracy (14 stron) przedstawiono dostępne metody analitycznego modelowania efektywnych (makroskopowych) stałych sprężystych oraz właściwości termicznych, stosowanych w przypadku kompozytów. Autorka opisuje modele Voigta oraz Reussa, a następnie ich modyfikacje dostosowane do kompozytów o wzajemnie przenikających się fazach. Są to między innymi modele Freya i Tuchinskii'ego oraz Fenga. W drugiej części rozdziału w skrócie opisano modele wykorzystywane do numerycznego modelowania efektywnych stałych sprężystości materiałów IPC.

Trzeci rozdział (12 stron) dotyczy głównie przeglądu modeli pękania kompozytów o wzajemnie przenikających się fazach. Opisano efekt mostkowania występujący w pęknięciach IPC oraz modele uwzględniające wzmocnienie szczeliny spowodowane występowaniem ciągliwych mostków wzmocniających. Krótko scharakteryzowano również rozszerzoną metodę elementów skończonych oraz możliwość jej zastosowania do modelowania propagacji pęknięcia w materiale.

W **czwartym rozdziale** (2 strony) opisano motywację prowadzonych badań, a także sformułowano cele i tezy pracy doktorskiej.

Rozdziały od piątego do siódmego (w sumie 106 stron) zawierają wyniki badań własnych Autorki rozprawy. **Rozdział piąty** (42 strony) dotyczy analitycznego i numerycznego modelowania efektywnych stałych sprężystości i właściwości termicznych materiałów IPC. Opisano i wyprowadzono autorskie analityczne modele V-R-V, V-V-R i R-V-V stanowiące modyfikację modeli Freya, Tuchinskii'ego i Fenga. Przedstawiono wyniki obliczeń za pomocą zaproponowanych modeli w odniesieniu do wyników

uzyskanych z wykorzystaniem modeli Voigta i Reussa. Analogicznie do modelowania stałych sprężystości, modele V-R-V, V-V-R i R-V-V zastosowano w modelowaniu efektywnego współczynnika rozszerzalności cieplnej IPC. W drugiej części rozdziału przedstawiono wyniki modelowania numerycznego. Opisano numeryczny model Mishnaevskiego i wyniki uzyskane za jego pomocą. Następnie przedstawiono modelowanie za pomocą metody elementów skończonych przy użyciu dwóch modeli obliczeniowych. Pierwszy to trójwymiarowy model uproszczony, reprezentujący włókno metalowe w osnowie ceramicznej. W drugim modelu wykorzystano mikrotomografię komputerową do odwzorowania przestrzennej morfologii badanego materiału IPC. Efektywne wartości stałych sprężystych otrzymane w wyniku obliczeń za pomocą obu modeli porównano z wynikami analitycznymi.

Na początku **szóstego rozdziału** (58 stron) opisano proces odkształcania i pęknięcia występujący w metalowo-ceramicznych kompozytach o wzajemnie przenikających się fazach. Zaprezentowano wyniki doświadczalnych badań propagacji pęknięć w materiale oraz odporności na kruche pęknięcie kompozytu Al_2O_3/Cu . Przedstawiono również wyniki analizy powierzchni pęknięcia kompozytu z włóknami miedzi uzyskane za pomocą mikroskopu skaningowego. Następnie opisano i omówiono cztery wstępne modele obliczeniowe dotyczące modelowania efektów odklejania oraz wyciągania sprężysto-plastycznego wzmocnienia z liniowo sprężystej matrycy oraz mostkowania występującego w pęknięciach materiałów IPC. Następnie dane uzyskane za pomocą modeli wstępnych zastosowano do modelowania odporności na kruche pęknięcie z wykorzystaniem próbki kompaktowej (Compact Tension - CT). Zbudowano trzy modele obliczeniowe. Dwa modele dotyczyły dwuwymiarowej i trójwymiarowej, uproszczonej reprezentacji włókien wzmacniających w próbce CT. W trzecim modelu, w strefie szczeliny, wykorzystano również odwzorowanie wzmocnienia kompozytu otrzymane na podstawie obrazów mikrotomograficznych.

W **rozdziale siódmym** (6 stron) podsumowano wyniki badań przedstawione w pracy doktorskiej. Zebrano wnioski nt. modelowania właściwości mechanicznych oraz procesów odkształcania i pęknięcia materiałów IPC, a także opisano dalsze kierunki badawcze.

W **załączniku** opisano szereg badań eksperymentalnych wykonanych w ramach pracy oraz opisano proces wytwarzania badanych materiałów kompozytowych.

W **spisie literatury** zamieszczono 188 publikacji, z czego 4 są współautorstwa Doktorantki.

2. Ocena pracy

Oceniając wybór tematu oraz cele i tezy rozprawy doktorskiej, przedstawione w jej rozdziale czwartym, uważam, że są one jak najbardziej aktualne naukowo, także o dużym znaczeniu praktycznym. Elementy oryginalne zawarte w pracy dotyczą głównie dostosowania i modyfikacji dostępnych modeli analitycznych i numerycznych oraz opracowanie nowych modeli obliczeniowych dla badanych kompozytów o wzajemnie przenikających się fazach. Do najważniejszych osiągnięć należy zaliczyć opracowanie:

- 1) trzech analitycznych rozwiązań (modele V-R-V, V-V-R i R-V-V) umożliwiających estymację stałych sprężystości oraz współczynnika rozszerzalności cieplnej materiałów IPC na podstawie modeli Freya, Tuchinskii'ego i Fenga;
- 2) trójwymiarowego obliczeniowego modelu krzyżowego do określania efektywnych wartości stałych sprężystości badanych kompozytów;
- 3) wstępnych modeli numerycznych do badań wpływu rozwarstwienia osnowy i pojedynczego włókna wzmacniającego na odkształcanie kompozytu;
- 4) rozszerzenia numerycznego modelu Bheemreddiego uwzględniającego w obliczeniach duże odkształcenia plastyczne we wzmocnieniu kompozytu, które mogą występować podczas wyciągania włókna z matrycy;
- 5) osiowo symetrycznego modelu numerycznego uwzględniającego rozwój delaminacji pomiędzy wzmocnieniem i matrycą IPC z wykorzystaniem kohezylnej granicy między fazami;
- 6) dwuwymiarowego modelu numerycznego uwzględniającego efekt mostkowania wzmocnienia w szczelinie służącego do określenia całki J;
- 7) oryginalnego modelu obliczeniowego łączącego wykorzystanie wyników obliczeń numerycznych za pomocą modeli wstępnych oraz modelu geometrycznego odwzorowującego rzeczywistą morfologię wzmocnienia kompozytu (uzyskaną na podstawie obrazów mikrotomograficznych) do numerycznych badań odporności na kruche pęknięcie z wykorzystaniem próbki CT.

Dodatkowo wykonano szereg oryginalnych badań eksperymentalnych, które częściowo weryfikują opracowane modele oraz prezentują mechanizm odkształcania i niszczenia badanych kompozytów o przenikających się fazach.

Przechodząc do uwag krytycznych, a przede wszystkim dyskusyjnych, poniżej wymienię ważniejsze z nich w kolejności ich powstawania podczas analizy niniejszej rozprawy doktorskiej.

1. W rozprawie doktorskiej opisano wiele modeli numerycznych, natomiast zwykle ich opis ogranicza się do ogólnych informacji na ich temat. Po szczegóły dotyczące modelowania Autorka odsyła do swoich publikacji, podczas gdy szczegółowe opisy prezentowanych modeli powinny stanowić integralną część pracy doktorskiej. Niniejsza uwaga dotyczy między innymi braku opisu: warunków brzegowych w modelu z rozdziału 5.2.2 (s. 67), kodu napisanego w celu tworzenia siatek elementów skończonych w modelu „voxel 1” (s. 71), sprężysto-plastycznego modelu materiału zastosowanego dla włókna metalowego w rozdziale 6.2.1 (s. 85) itd.
2. W wyniku wykonanych obliczeń numerycznych uzyskano między innymi rozkłady naprężeń w materiale. Niestety przy żadnym z rysunków oraz w tekście nie opisano jednostek wartości naprężenia. Konieczność domyślenia się czy wyniki podano w Pa, MPa itd. znacząco utrudnia jednoznaczną interpretację przedstawionych wyników badań, np. na rysunku 5.10d maksymalne naprężenie w kierunku przyłożonego obciążenia wyniosło $2,48e+3$; na rysunku 6.19h było równe $2,787e+8$, a na rysunku 6.44d wyniosło $3,045e+4$. Jednostki naprężenia powinny zostać ujednocnione i podane w tekście, bądź znajdować się na każdym z rysunków.
3. W rozdziale 5.2.3 omówiono modelowanie numeryczne z wykorzystaniem modeli geometrycznych uzyskanych na podstawie obrazów mikrotomograficznych. Na s. 76 Autorka stwierdziła, że zawartość fazy miedzianej w badanej objętości reprezentatywnej wyniosła około 15%, natomiast makroskopowa zawartość nominalna to 25% Cu. Ze względu na tak dużą różnicę procentowej zawartości miedzi w materiale należałoby wydzielić model geometryczny o większej objętościowej zawartości miedzi, zbliżonej do wartości nominalnej. W ten sposób wyniki obliczeń byłyby bardziej reprezentatywne dla tego typu materiału.
4. Do numerycznego modelowania efektywnych wartości stałych sprężystości oraz badań kruchego pęknięcia materiałów IPC wykorzystano między innymi modele geometryczne odwzorowujące rzeczywistą strukturę kompozytów. W przypadku wykorzystywania tego typu modeli ważnym zagadnieniem jest dobór właściwego rozmiaru objętościowego elementu reprezentatywnego (RVE). W jaki sposób dobierano rozmiar RVE i czy sprawdzano wpływ jego wielkości na wyniki modelowania? Kolejny element budzący wątpliwości to uzyskana dokładność obrazów mikrotomograficznych, która w tym przypadku wynosiła $9,12 \mu\text{m}$ (wielkość woksela). Na rysunku A6 pokazano, że grubość włókien wzmacniających to około $20 \mu\text{m}$, tak więc kształt włókna na obrazie mikrotomograficznym byłby odwzorowany za

pomocą około dwóch pikseli. W celu zwiększenia dokładności modelu obliczeniowego i odwzorowania struktury badanych materiałów IPC należałoby zmniejszyć rozmiar piksela, co umożliwiłoby uzyskanie większej liczby detali geometrii mikrostruktury. W pracy Doroszki i Seweryna (*Materials Science & Engineering A*, 2017) pokazano, że detale geometrii niejednorodnej struktury materiału (nieciągłości na granicy faz, małe pory), znajdujące się poza dokładnością urządzenia mikrotomograficznego, mogą mieć znaczący wpływ na uzyskiwane efektywne wartości naprężenia oraz na rozkład naprężeń i odkształceń w zdeformowanym RVE. W celu weryfikacji poprawności odwzorowania mezostruktury IPC (za pomocą micro-CT) warto byłoby porównać przekładowe zbinaryzowane obrazy mikrotomograficzne z obrazem struktury uzyskanym np. za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego. Ponadto wykorzystane w pracy objętości reprezentatywne zbudowane z wokseli generują znaczące zniekształcenia obliczonych wartości naprężeń i odkształceń wprowadzając efekt karbu pomiędzy kolejnymi warstwami wokseli. Z rysunków 6.1, A6 wynika, że modele zawierające wygładzony kształt zbrojenia bardziej realistycznie reprezentowałyby rzeczywisty kształt włókien w obliczeniach numerycznych. Ma to szczególnie duże znaczenie z uwagi na rozmiar piksela obrazów mikrotomograficznych.

5. W rozdziale 6 opisano wyniki obliczeń uzyskane za pomocą kilku modeli numerycznych. W celu weryfikacji zaproponowanych modeli warto byłoby przeprowadzić eksperymentalną weryfikację uzyskanych wyników badań. Czy możliwe jest wykonanie tego typu badań doświadczalnych przynajmniej dla części zaprezentowanych modeli? Jakie procedury badawcze należałoby wykorzystać?
6. Mam także duże wątpliwości co do zastosowania całki niezmienniczej J w prognozowaniu pęknięcia metalowo-ceramicznych kompozytów o wzajemnie przenikających się fazach, biorąc pod uwagę wysoką niejednorodność materiału i silną nieliniowość jednej z faz. Przedstawiona w szeregu wcześniejszych prac weryfikacja kryterium całki J wykazuje dużą rozbieżność pomiędzy wynikami obliczeń i wynikami badań eksperymentalnych nawet w przypadku materiałów jednorodnych, ale nieliniowych. Krytyczna wartość tej całki jest bowiem zależna nie tylko od krytycznej wartości energii odkształcenia uwalnianej w procesie pęknięcia, ale także od energii dysypowanej na odkształcenia plastyczne, a więc i od wielkości i kształtu stref plastyczności przed wierzchołkiem szczeliny oraz kształtu próbki lub elementu konstrukcyjnego.

Dodatkowo chciałbym wymienić szereg uwag i pytań szczegółowych (także dyskusyjnych), które wymagają wyjaśnienia, a mianowicie:

- 1) w rozdziale 5, w podrozdziale dotyczącym modelu V-V-R, Autorka stwierdziła, że zależność określająca moduł ścinania w modelu V-V-R jest taka sama jak w przypadku modelu Fenga, natomiast na wykresach (rys. 5.3) krzywe uzyskane przy pomocy modelu Fenga są zgodne z krzywymi określonymi przy użyciu R-V-V. Krzywe otrzymane w wyniku użycia modelu V-V-R są najbardziej zbieżne z rozwiązaniem V-R-V;
- 2) na s. 62 Autorka napisała, że wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej obliczane za pomocą V-V-R są największe, a w przypadku modułu Younga najmniejsze. Z rysunków 5.7 i 5.2 wynika, że w obydwu przypadkach wartości uzyskiwane za pomocą modelu V-V-R są największe spośród modeli autorskich. Natomiast dla modelu R-V-V α i E osiągają wartości najmniejsze;
- 3) dlaczego w modelu z rozdziału 5.2.3 użyto innych warunków brzegowych niż w przypadku modelu „krzyżowego”?
- 4) co jest powodem, że zachodzi tak duży wzrost odporności na pękanie po przekroczeniu 0,0034 m długości pęknięcia (rys. 6.5)?
- 5) czy moduł umocnienia H_{iso} (tab 6.2) we właściwy sposób odzwierciedla charakter umocnienia miedzi wykorzystanej na wzmocnienie IPC?
- 6) w tabeli 6.2 granica plastyczności miedzi to 130 MPa, natomiast w tabeli 6.3 wynosi ona 50 MPa. Z czego wynika tak duża rozbieżność wartości?
- 7) w rozdziale 6.2.1 dla dwuwymiarowego modelu ze skośnym włóknem założono płaski stan odkształcenia. Jak wiadomo we włóknie nie występuje PSO. Czy tego typu uproszczenie nie miało wpływu na zniekształcenie wyników obliczeń numerycznych?
- 8) w części pracy parametry ψ był równy 0,5; 1 i 1,5; a następnie 0,4; 0,6 i 2. Jakie było kryterium doboru bezwymiarowego parametru długości rozdziału faz ψ ?
- 9) w modelach widocznych na rysunkach 6.14 i 6.23 można było zastosować warunek symetrii i usunąć połowę elementów skończonych oraz przyspieszyć obliczenia numeryczne;
- 10) na rysunku 6.16 ekwiwalentne odkształcenie plastyczne wyniosło od 154,6% do 210,3%. W jaki sposób można wytłumaczyć tak dużą wartość odkształcenia włókna miedzianego?
- 11) na rysunku 6.37 pokazano rozkład odkształcenia we włóknach wzmacniających, umiejscowionych w szczelinie kompozytu. W części środkowych włókien występuje

mniejsze odkształcenie maksymalne niż we włóknach najbardziej oddalonych od wierzchołka szczeliny. Czym jest to spowodowane?

- 12) z rysunku 6.31 nie wynika, że dochodzi do szybkowania włókien wzmacniających matrycę, co było uwzględnione w modelu.

Redakcję recenzowanej rozprawy należy ocenić jako dość dobrą. Większość przeprowadzonych badań została w miarę rzetelnie opisana i odpowiednio zilustrowana. Układ pracy jest logiczny i przejrzysty. Wybrane uwagi dotyczące redakcji rozprawy (które miały bardzo mały wpływ na jej ocenę końcową), można zawrzeć w następujących punktach:

- 1) moim zdaniem sformułowanie „mikro” jest trochę na wyrost, gdyż badania dotyczyły struktury materiału w skali „mezo” (np. uwzględnienie morfologii poszczególnych faz kompozytu);
- 2) sformułowanie „elastic-plastic large deformation” (s. 8) jest niepoprawne – w opisywanych materiałach występują tylko duże odkształcenia plastyczne;
- 3) legitimate (s. 13) – sformułowanie bardziej pasuje do języka prawniczego;
- 4) często występuje brak spójności językowej np. Autorka raz używa, a innym razem pomija użycie myślnika w niektórych sformułowaniach (np. J integral/J-integral, state of art/state-of-art);
- 5) można również zauważyć mieszanie słów British i American English (modeling/modelling). W pracach anglojęzycznych powinno się zdecydować na stosowanie jednej z wersji;
- 6) w pracy występuje też sporo literówek i błędów językowych np. espectively (s. 26), best bez poprzedzającego the (s. 34), metallic (s. 85) itd.;
- 7) K_K – modulus of the i -th phase, czy nie powinno być k -th phase?
- 8) w tekście najpierw występuje tabela 6.5, a później tabela 6.4;
- 9) brakuje tabeli A5.1 podanej w tekście na s. 151;
- 10) tabela 5.1 nie zawiera danych nt. porowatości, jak to stwierdzono na s. 151;
- 11) warunki brzegowe prezentowane na rysunku 6.34 i 6.44 są trudne do zinterpretowania;
- 12) brak rysunku 6.41 przywoływanego w tekście;
- 13) praca Poniżnik i in. (2015) (in print) znajdująca się w spisie literatury została opublikowana.

3. Podsumowanie

Na podstawie analizy rozprawy stwierdzam, iż została ona wykonana na dobrym poziomie merytorycznym i redakcyjnym. Mgr inż. Zuzanna Agnieszka Poniżnik wykazała się szeroką wiedzą (i umiejętnościami) dotyczącymi wykorzystania zaawansowanych metod analitycznych i numerycznych w zagadnieniach związanych z wyznaczaniem właściwości mechanicznych i termicznych oraz modelowaniem procesów odkształcania i pęknięcia metalowo-ceramicznych kompozytów o wzajemnie przenikających się fazach (IPC – interpenetrating phase composites). W wyżej wymienionej tematyce Doktorantka otrzymała szereg oryginalnych wyników badań, które wnoszą istotny wkład do rozwoju dyscypliny *mechanika*, w szczególności specjalności *mechanika materiałów*. Należy przy tym podkreślić szeroki zakres (modelowanie analityczne i numeryczne, badania doświadczalne) i wysoki stopień trudności przeprowadzonych badań (materiał silnie niejednorodny i nieliniowy).

Pozytywnie oceniam także fakt opublikowania znaczącej części wyników badań w uznanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym, indeksowanych w bazie Journal Citation Index, takich jak: *Computational Materials Science* (IF = 1,549), *International Journal of Damage Mechanics* (IF = 1,783), czy też *Advanced Engineering Materials* (IF = 2,319). Tam też przeszły one pełny proces opiniowania przez uznanych specjalistów o międzynarodowej renomie.

Nie mam wątpliwości, że przedstawiona do recenzji praca mgr inż. Zuzanny Agnieszki Poniżnik pt. *Modelling of effective properties and fracture of metal-ceramic interpenetrating phase composites*” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez *Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach naukowych i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65 z 16 kwietnia 2003 r., poz. 595)* i powinna być dopuszczona do publicznej obrony, a mgr inż. Zuzanna Agnieszka Poniżnik może ubiegać się o nadanie stopnia *doktora nauk technicznych* w dyscyplinie *mechanika*.



