

RECENZJA

**Rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława Nosala
nt. „Modelowanie procesu stopowania tarcowego FSA oraz estymacja właściwości
mechanicznych uzyskanego kompozytu”**

Formalna podstawa recenzji

Podstawę formalną opracowania przedmiotowej recenzji, stanowiła uchwała Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej z dnia 12 lipca 2023 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej i przedstawiona w skierowanym do mnie piśmie przez Pana Dziekana Wydziału Mechanicznego PK. Recenzowana praca została napisana pod kierunkiem Pana prof. dr hab. inż. Artura Ganczarskiego z udziałem promotora pomocniczego dr inż. Marka Węglowskiego.

Aktualność podjętego tematu

Technologia zgrzewania tarcowego FSW opatentowana w roku 1991 doczekała się wielu modyfikacji. Intensywny rozwój na wielu płaszczyznach i zastosowaniach rozpoczął się wraz z końcem okresu patentowego. Analizowana w pracy technologia stopowania tarcowego FSA jest pewną modyfikacją metody zgrzewania tarcowego z mieszaniem materiału zgrzeiny, bazującą na tych samych prawach fizyki i w pełni wykorzystującą zalety technologii zgrzewania. Celem stosowania technologii FSA jest poprawa właściwości fizycznych oraz mechanicznych modyfikowanych materiałów. W trakcie procesu modyfikacji materiału dochodzi do sprzężenia różnych zjawisk fizycznych, przy czym dominującą rolę w generowaniu energii cieplnej odgrywa tarcie powierzchniowe oraz odkształcenie plastyczne materiału w obszarze oddziaływania narzędzia. Prace badawcze prowadzone nad zastosowaniami technologii FSA koncentrują się w głównej mierze wokół kompozytów na bazie aluminium tzw. AMC. Z uwagi na specyficzne właściwości, takie jak stosunek wytrzymałości do masy oraz wysokie parametry zmęczeniowe, kompozyty te są atrakcyjnymi materiałami do zastosowań w różnych gałęziach przemysłu, gdzie jako materiał ich wzmocnienia stosuje się głównie cząsteczki ceramiki: TiC, SiC, Al₂O₃, lub B₄C. Zastosowanie technologii FSA umożliwi także wytwarzanie materiałów typu FGM. Przeprowadzone badania kompozytów Al - SiC potwierdzają, że otrzymany w ten sposób materiał charakteryzuje się ciągłą zmianą właściwości po grubości próbki. Nadal prowadzone są badania nad optymalnym doбором wielkości cząsteczek, udziału objętościowego wzmocnienia oraz strategiami wytwarzania kompozytu. Metodę FSA można uznać ze jedną z nowych metod w zakresie produkcji kompozytów FGM.

Zjawiska fizyczne zachodzące w procesie FSA są stosunkowo trudne w opisie matematycznym, dlatego do tej pory nie opracowano odpowiedniego modelu matematycznego, który opisywałby proces FSA oraz zachowanie się tak wytworzonego kompozytu w polu obciążenia mechanicznego lub termicznego. W praktyce szeroko stosuje się popularną metodę elementów skończonych MES, jednak w przypadku procesu FSA należy zastosować wiele uproszczeń co znacznie ogranicza jej stosowanie. W symulacji procesów zgrzewania można spotkać również inne metody w szczególności bezsiatkowe np. DEM czy też SPH, które lepiej się sprawdzają dla dużych odkształceń. W przypadku metody DEM, zastosowanej w pracy doktorskiej, opierającej się na bezpośrednim opisie ruchu i interakcji pojedynczych cząstek wewnątrz analizowanego materiału, możliwe jest dokładniejsze modelowanie zjawisk takich jak tarcie czy oddziaływanie kontaktowe. Dodatkowo DEM umożliwia modelowanie zmian topologii materiału oraz jej struktury, a także uwzględnienie nieciągłości materiałowych w postaci pęknięć.

W związku z powyższym tematykę opiniowanej pracy uważam za celową i aktualną z naukowego i praktycznego punktu widzenia.

Aktualność podejmowanej tematyki potwierdzają polskie i zagraniczne doniesienia literaturowe. Wyniki z pewnością znajdą zastosowanie w praktyce przemysłowej. Mocną stroną tematyki pracy jest jej naukowy charakter oraz potencjał aplikacyjny.

Zakres opiniowanej pracy

Struktura pracy składa się z sześciu rozdziałów głównych, z których pierwsze dwa dotyczą badań literaturowych, natomiast kolejne pięć rozdziałów zawiera autorskie opracowanie tematu dysertacji. Recenzowana praca liczy 135 stron, jest bogato ilustrowana, zawiera 67 rysunków, 6 tabel oraz 168 pozycji literatury, ponadto w pracy znajdują się streszczenia po polsku i angielsku, trzy dodatki, spis rysunków i tablic.

We wstępie Autor przedstawił tło zagadnienia w kontekście przedmiotu rozprawy doktorskiej, którym jest technologia stopowania tarcioowego FSA. W tym fragmencie pracy szczególną uwagę zwrócono uwagę na wady i zalety technologii FSW.

Autor na podstawie literatury słusznie wnioskuje, że złożoność zjawisk fizycznych towarzyszących procesowi zgrzewania tarcioowego przysparza wiele trudności w doborze odpowiednich parametrów technologicznych. Problem ten najczęściej jest rozwiązywany w sposób empiryczny, przez przeprowadzanie testów różnych konfiguracji prędkości obrotowej i prędkości liniowej oraz weryfikacji jakościowej uzyskanych złączy. Niemniej wkład pracy oraz czas potrzebny do opracowania technologii sprawia, że zadanie jest mało efektywne i nieekonomiczne. Z tego też względu dąży się do zastąpienia badań eksperymentalnych badaniami numerycznymi, na podstawie których możliwe będzie oszacowanie wybranych właściwości wykonanej zgrzeiny/warstwy modyfikowanej.

Istotnym aspektem poruszonym w tej części pracy jest analiza metod numerycznych używanych w symulacji procesu FSW. Autor opisuje charakterystyczne cechy danej metody i wymienia jej wady i zalety w kontekście jej wykorzystania do symulacji procesu.

Część literaturowa pracy prezentuje aktualny stan zagadnienia w zakresie analizowanego obszaru wiedzy, zawiera wieloaspektowe odniesienia do literatury przedmiotu. Na uwagę zasługuje obszerny udokumentowany przegląd literatury.

Motywacja. Teza. Cel i zakres pracy. Autor we wstępie zawarł również niezbędne aspekty pracy. Odczytaną przeze mnie motywacją Autora jest chęć zastosowania oprogramowania o otwartej budowie (open source), w którym zostaną zaimplementowane odpowiednie równania konstytutywne opisujące proces odkształcenia materiału w zadanym polu obciążenia w celu oszacowania podstawowych parametrów mechanicznych wytworzonych kompozytów.

W wstępie pracy, na podstawie literatury, Autor formułuje następujące tezy rozprawy:

1. *Na podstawie symulacji numerycznej procesu plastycznego w podwyższonej temperaturze, możemy określić właściwości mechaniczne materiału modyfikowanego metodą FSA.*
2. *Zastosowanie złożonych modeli konstytutywnych w ujęciu metody elementów dyskretnych w poprawny sposób opisuje zachowanie ciała stałego w złożonym stanie obciążenia wstępującego w pierwszym etapie procesu FSA.*

W moim odczuciu jako pierwszą można było zdefiniować tezę drugą, która daje podstawy do formułowania tezy pierwszej. Wynikiem motywacji Autora i zaprezentowanych tez pracy był cel i zakres pracy przedstawiony w sposób opisowy. Głównym celem pracy było opracowanie modelu numerycznego opartego na metodzie elementów dyskretnych, umożliwiający analizę złożonych zjawisk fizycznych determinujących końcowe właściwości mechaniczne materiału. W budowie modelu numerycznego zostanie zastosowana uogólniona teoria mechaniki ośrodków ciągłych. W celu weryfikacji utworzonego modelu numerycznego Autor zaplanował szereg symulacji numerycznych dotyczących zagadnień termicznych, mechanicznych oraz termiczno-mechanicznych, których wyniki będą porównane z rozwiązaniami otrzymanymi analitycznie lub numerycznie na podstawie analizy metodą elementów skończonych. Autor odniósł się w tej części pracy do porównania wyników utworzonego modelu numerycznego do badań eksperymentalnych, które wykonał i opisał w rozdziale czwartym.

Teoretyczny opis modelu sprężysto-lepko-plastycznego z uszkodzeniem stanowi obszerny rozdział pracy w którym zaprezentowano klasyczne sformułowanie mechaniki ośrodków ciągłych bez uwzględnienia wewnętrznej budowy strukturalnej opisywanego materiału. Model mechaniczny został sprzężony z modelem termicznym dla którego Autor przedstawił wyprowadzenie równania Fouriera z uwzględnieniem warunków brzegowych.

Koncepcja modelu sprężysto-lepko-plastycznego z uszkodzeniem w ujęciu metody elementów dyskretnych stanowi kolejny obszerny rozdział pracy. W rozdziale, przedstawiono implementację modelu mikropolarnego sprężysto-lepkoplastycznego z uszkodzeniem (TEVP). Implementację numeryczną przeprowadzono wykorzystując podstawy sformułowania metody elementów dyskretnych. Przedstawiony model jest oryginalnym opracowaniem autora i różni się w opisie sił interakcji, w stosunku do standardowo stosowanych modeli. Modyfikacja opisu

sił kontaktowych została rozbudowana o sprzężenie z modelem termicznym oraz wprowadzono model tarcia Coulomba. Pozwoliło to uwzględnić w warunkach brzegowych strumień ciepła, generowany na skutek tarcia dwóch powierzchni, co w analizowanym procesie odnosi się do kontaktu narzędzia i materiału modyfikowanego. Rozdział zawiera również krótkie wprowadzenie do metody elementów dyskretnych wraz z omówieniem problemu stabilności rozwiązania, a także zastosowaniem skalowania modelu. Na końcu rozdziału zaprezentowano kilka przykładów weryfikacji zaimplementowanego modelu TEVP.

Zastosowanie proponowanego modelu TEVP w symulacji pierwszego etapu procesu FSA jest pierwszą próbą weryfikacji opracowanego modelu numerycznego. Ponieważ zjawiska zachodzące podczas procesu stopowania tarcowego FSA, są zjawiskami złożonymi i trudnymi do rejestracji to istnieje trudność w pełnej weryfikacji modelu numerycznego na drodze eksperymentalnej. Jedną z możliwości jest weryfikacja pośrednia, poprzez porównanie wybranych charakterystyk będących efektem oddziaływania danego zjawiska na materiał. W Rozdziale tym Autor modeluje proces stopowania tarcowego, przy czym rozważany jest jedynie pierwszy etap tego procesu. Weryfikację modelu przeprowadzono na drodze porównania wyników numerycznych z wynikami otrzymanymi na drodze eksperymentalnej. W części doświadczalnej pracy, zaprezentowano zarówno rejestrację sił, momentu oraz temperatury podczas przebiegu procesu stopowania tarcowego, jak również wykonano badania mikrostrukturalne oraz mechaniczne w postaci pomiarów nanotwardości uzyskanego kompozytu. Autor w dysertacji ocenił wartość granicy plastyczności na podstawie zależności liniowej przyjętej na podstawie literatury (równanie 4.4). Graficznie zależność zestawiono na rysunku 4.12. Wyniki numeryczne symulacji procesu FSA zestawione w rozdziale 4.4 otrzymano przy użyciu opracowanego modelu sprężysto-lepko-plastycznego z uszkodzeniem. Wartości siły osiowej, momentu obrotowego, profilu temperatury oraz nanotwardości zestawiono z danymi eksperymentalnymi w celach porównawczych. Czas obliczeń numerycznych po zastosowaniu współczynnika skalującego c wyniósł 15 h 43 min. Autor w pracy stwierdza, że wartość energii generowanej na skutek odkształcenia Q_e jest o 63% niższa od maksymalnej wartości energii generowanej na skutek tarcia, przy czym 90% Q_f jest przekazywane do materiału modyfikowanego.

Po prezentacji wyników Autor przeprowadza *dyskusję* wyników, w której wyjaśnia kluczowe aspekty rezultatów swoich badań. Omówienie rezultatów badań prezentuje syntetyczną analizę poszczególnych wyników w kontekście tematu rozprawy. W dyskusji Autor często powołuje się na dane literaturowe w odniesieniu do swoich badań. Doktorant stwierdza, że pomimo pewnych niezgodności modelu numerycznego, w porównaniu z rzeczywistym zachowaniem się materiału, należy zwrócić uwagę na to, że zastosowanie modelu uszkodzenia umożliwiło odwzorowanie efektu ścinania w wyniku zagłębiania się trzpienia narzędzia w materiał, który to efekt jest najlepiej widoczny w przypadku technologii wykrawania. Nieuwzględnienie zjawiska ewolucji uszkodzeń może prowadzić do dużo większych rozbieżności w generowanych wynikach, a w skrajnych sytuacjach do braku rozwiązania.

Wnioski końcowe i kierunki dalszych badań stanowią ostatni numerowany rozdział pracy, w którym Autor odnosi wyniki badań do założonych celów pracy. We wnioskach

końcowych Autor stwierdza, że pomimo, iż opracowany model wykazuje pewne ograniczenia w modelowaniu procesów plastycznych, to na jego podstawie można określić przybliżony rozkład wybranych właściwości mechanicznych modyfikowanego materiału. Natomiast zastosowanie złożonych modeli konstytutywnych w ujęciu metody elementów dyskretnych wymaga przeformułowania pewnych założeń początkowych, aby poprawnie odwzorować zachowanie ciała stałego w złożonym stanie obciążenia. W związku z tym sformułowane tezy pracy nie zostały w pełni udowodnione.

Uwagi redakcyjne

- Str. 22, linia 18: jest „...wstępującego...” powinno być „...występującego...”
- Str. 22 jako pierwszą można było zdefiniować tezę drugą, która daje podstawy do formułowania tezy pierwszej,
- Str. 75 rys.3.25. brak oznaczenia, które wyniki są wykonane z użyciem DEM, a które MES. Brak również jednostki temperatury i odniesienia w czasie.
- Str. 81, linia 8 jest: „...czy...” powinno być „...czym...”
- Str. 96, linia 7: Zdanie „*Wynikiem tego są zmiany w wartości danych numerycznych, które przewyższają wartości numeryczne o 114% dla momentu obrotowego i aż o 1100% dla siły osiowej*” wymaga szerszego wyjaśnienia zarówno w aspekcie redakcyjnym, jak i merytorycznym.
- Str. 103, Rys. 4.23: jest „...została...” powinno być „...została...”

Uwagi dyskusyjne

- W pracy podano model tarcia zastosowany w obliczeniach, jednak nie znalazłem informacji na jakiej podstawie przyjęto wartość współczynnika tarcia użytego do obliczeń. Proszę o omówienie i podanie wartości współczynników tarcia przyjętych w obliczeniach.
- Dlaczego do weryfikacji generowania ciepła na skutek tarcia zastosowano (rozdział 3.4.5.) dwa prostopadłościany, a nie na przykład dwa osiowosymetryczne pręty, z których jeden się obraca i jest dociskany na powierzchni czołowej do drugiego, co bardziej oddawałoby warunki eksperymentu zawarte w pracy?
- Str.90, linia 4: Na jakiej podstawie przyjęto, że 90% ciepła tarcia jest przekazywane do elementu modyfikowanego?
- Autor tłumaczy różnicę w szczytowych temperaturach przedstawionych na rys. 4.18. ograniczoną ilością generowanej energii na skutek tarcia. Co ogranicza ilość generowanej energii na skutek tarcia?
- W każdym procesie obróbki plastycznej (w tym w procesach FSW) objętość materiału przed odkształceniem jest taka sama jak po odkształceniu. Czy na rys. 6.1a występuje deficyt objętości po odkształceniu, a jeśli tak to dlaczego?

Ocena merytoryczna rozprawy

Przegląd literatury bazujący na 168 pozycjach był podstawą zdefiniowania celu i zakresu pracy. Przedstawione przez Doktoranta dane literaturowe dotyczą bezpośrednio problematyki rozważanej w pracy, umożliwiają ocenę aspektów poznawczych i naukowych pracy. Cytowane prace są aktualne i dobrze dobrane, w dużej części są to publikacje z renomowanych czasopism.

Rozprawa doktorska w dużej mierze skupia się na opracowaniu koncepcji modelu sprężysto-lepko-plastycznego z uszkodzeniem w ujęciu metody elementów dyskretnych. Praca przedstawia zagadnienie badawcze zarówno od strony sformułowanych treści, jak i formy rozprawy. Struktura rozprawy w moim przekonaniu jest prawidłowa. W rozprawie nie ustrzeżono się drobnych błędów edytorskich, które nie wpływają w istotny sposób na czytelność i zrozumienie intencji Autora. Procedury badawcze użyte w pracy są w większości standardowe lub znormalizowane i przyjęte w pracy zgodnie z ich przeznaczeniem.

Doktorant krytycznie podchodzi do rezultatów swoich badań stwierdzając, że co prawda otrzymane wyniki nie korelowały z danymi eksperymentalnymi w sensie ilościowym, lecz jakościowo oddały charakter rozkładu np. nanotwardości w strefie modyfikowanej.

Z punktu widzenia aplikacyjnego, najbardziej obiecujące są wyniki sugerujące predykcję nieciągłości materiału, co zostało pokazane we wnioskach pracy na rysunku 6.1. Rozwinięcie tej idei może w przyszłości pozwolić na jej wykorzystanie do eliminacji wad procesów FSW. Za mniej dopracowany element modelu numerycznego uważam przyjęcie sztywnych właściwości narzędzia bez interakcji z elementem podlegającym obróbce oraz nieuwzględnienie w symulacji numerycznej liniowego ruchu narzędzia.

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Przemysława Nosala zawiera próbę samodzielnego opracowania zagadnienia naukowego. Doktorant wykazał się wiedzą oraz umiejętnościami prowadzenia badań naukowych i prezentacji wyników. Na podkreślenie zasługuje fakt, że dysertacja została zrealizowana przy dużym nakładzie pracy i środków związanych z wykonaniem badań numerycznych. Wykonanie badań wymagało od Doktoranta znajomości teorii i praktyki badawczej z zakresu inżynierii mechanicznej oraz prowadzenia symulacji numerycznych przy użyciu metody elementów dyskretnych DEM.

Uzyskane wyniki nie dają jednak należytej zbieżności między modelem numerycznym a eksperymentem co niewątpliwie obniża wartość pracy. Przykładem braku zbieżności są np. wyniki rozkładu temperatury zaprezentowane na rysunku 4.16, które pokazują, że maksimum temperatury występuje na powierzchni styku próbki i powierzchni, na której próbka jest podparta, a minimum temperatury występuje na powierzchni kontaktu próbki z narzędziem. Trudno tutaj się doszukać nawet jakościowej zależności, ponieważ praktyka i literatura (np. <https://doi.org/10.1007/s12289-008-0138-5>) pokazuje, że jest zupełnie odwrotnie. Zresztą sam Autor w rozdziale 5. stwierdza, że „...zjawisko tarcia powierzchniowego jest dominującym źródłem ciepła podczas procesu FSA”, dlatego należałoby się spodziewać maksymalnej temperatury na powierzchni styku narzędzia i próbki.

Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Przemysława Nosala pt. „**Modelowanie procesu stopowania tarcowego FSA oraz estymacja właściwości mechanicznych uzyskanego kompozytu**” mieści się w zakresie dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna.

Temat pracy doktorskiej jest sformułowany zbyt szeroko w stosunku merytorycznej zawartości treści pracy. W szczególności model numeryczny DEM uwzględnia jednorodną charakterystykę materiału, a nie charakterystykę kompozytu jak wskazano w tytule pracy. Ponadto model numeryczny nie uwzględnia ruchu liniowego narzędzia co jest kluczowe dla procesu stopowania tarcowego FSA. Estymację właściwości mechanicznych kompozytu wykazano w pracy tylko dla jednego parametru tj. granicy plastyczności. Oszacowanie profili nanotwardości uzyskanego kompozytu przyjęto jako funkcję granicy plastyczności w oparciu o literaturę.

Doktorant zrealizował założone cele badawcze wykazując się znajomością zagadnień z zakresu inżynierii mechanicznej, jednak wyniki prac badawczych budzą moje wątpliwości. Uzyskane i wskazane w pracy różnice między obliczeniami i eksperymentem są zbyt duże i niewiele wnoszą w rozwój wiedzy w tym obszarze. Tezy pracy, jak zresztą sam autor stwierdza, nie zostały w pełni udowodnione, co w moim przekonaniu jest wynikiem niedoskonałości modelu numerycznego.

W mojej ocenie przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Przemysława Nosala podejmuje próbę rozwiązania złożonego problemu badawczego, jednak nie do końca spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. – o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2016 r. poz. 882) mimo wykazanych zastrzeżeń do treści merytorycznej pracy wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony w celu odniesienia się Doktoranta do uwag.



.....
Prof. dr hab. inż. Piotr LACKI
Politechnika Częstochowska
Częstochowa, 17.05.2023