

Prof. dr hab. inż. Aleksander Karolczuk
Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
Wydział Mechaniczny
Politechnika Opolska
Ul. Mikołajczyka 5
45-271 Opole

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Sulicha

„Modelowanie procesu niskocyklowego zmęczenia stali w warunkach nieizotermicznych”

1. Podstawa formalna opracowania

Recenzja została opracowana na podstawie pisma prof. dr hab. inż. Jerzego A. Sładek, Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej, pismo M.00-520-47/2021 z dnia 23.02.2021 r. z informacją o powołaniu na recenzenta pracy doktorskiej mgr inż. Piotra Sulicha „Modelowanie procesu niskocyklowego zmęczenia stali w warunkach nieizotermicznych” zgodnie z uchwałą Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej z dnia 17.02.2021.

2. Ilościowa charakterystyka rozprawy

Rozprawa jest opracowaniem złożonym z 122 stron podzielona odpowiednio na: przedmowę, spis ważniejszych oznaczeń oraz 5 rozdziałów. Na końcu pracy zamieszczono streszczenia w języku polskim i angielskim. W pracy zamieszczono 74 rysunki oraz 18 tabel. Spis literatury obejmuje 107 pozycji w tym 5 prac współautorstwa doktoranta, z czego 3 prace (dwie za 40 punktów i jedna za 200 punktów) znajdują się w wykazie czasopism naukowych ogłoszonego w Komunikacie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 9 lutego 2021 roku. Brak prac samodzielnych.

3. Ocena rozprawy

3.1. Ocena wyboru tematyki badawczej

Modelowanie kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych i ich wpływ na zdolność przenoszenia obciążeń jest ważnym aspektem ekonomicznego wykorzystania materiałów w procesie projektowania konstrukcji i urządzeń. Szczególnie trudnym obszarem do modelowania są materiały zastosowane w konstrukcjach i urządzeniach pracujących w warunkach zmiennych obciążeń termo-mechanicznych. Prawidłowe modelowanie w takich warunkach musi uwzględniać wpływ temperatury, kumulacji

uszkodzeń zmęczeniowych na zmianę właściwości fizycznych materiału i na zdolność przenoszenia obciążeń. Oceniana praca doktorskiej podejmuje ten temat badawczy ograniczony do cyklicznych obciążeń jednoosiowych w warunkach izotermicznych i nieizotermicznych. Wybór tematyki jest zasadny, bardzo ambitny i musiał zostać na tym etapie ograniczony do obciążeń jednoosiowych.

3.2. Ocena poprawności tytułu rozprawy

Tytuł pracy jest precyzyjny i zgadza się z treścią rozprawy.

3.3. Ocena doboru literatury

Oceniam dobór literatury za poprawny. 40% prac pochodzi z ostatnich 10 lat, co świadczy o znajomości najnowszych osiągnięć w badanym temacie.

3.4. Ocena poszczególnych rozdziałów

3.4.1. Przedmowa i spis oznaczeń.

W przedmowie dokonano krótkiego wprowadzenia do tematyki badawczej oraz krótko scharakteryzowano zawartość poszczególnych rozdziałów w pracy. W spisie oznaczeń (w dalszej części pracy również) niepoprawnie stosuje się liczbę mnogą do wyrażenia typu „składowe tensora odkształceń plastycznych” zamiast „składowe tensora odkształcenia plastycznego”. Tensor jako jeden obiekt, itp. tensor naprężenia, odkształcenia. Również, zamiast „amplituda naprężeń” powinno być „amplituda naprężenia”. Drobne błędy literowe, strona 9 „w równaniu kinetycznym”.

3.3.2. Rozdział 1. Wprowadzenie.

Rozdział „Wprowadzenie” zawiera trzy podrozdziały. Pierwszy podrozdział bardzo dobrze opisuje tło techniczne problemu, licznie odwołując się do literatury związanej z energetyką. W drugim podrozdziale określono cel i tezę pracy, jako „uwzględnienie w modelu konstytutywnym zmęczenia niskocyklowego dla stali P91 sprzężonych mechanizmów plastyczności, uszkodzeń zmęczeniowych oraz prędkości zmian temperatury w istotny sposób poprawia zdolności predykcyjne modelu”. Natomiast cel pracy określono jako „prezentacja kompleksowego modelowania zachowania się stali poddanej zmęczeniu niskocyklowemu w warunkach nieizotermicznych, na przykładzie stali martenzytycznej o oznaczeniu P91...”. Słowo „prezentacja” jest niepotrzebne, celem powinno być opracowanie modelu i jego weryfikacja. Teza pracy wydaje się dosyć oczywista, jednakże oceniam ją jako dopuszczalną. Trzeci podrozdział to przegląd prac związanych z badaniami eksperymentalnymi oraz modelowaniem zachowania się materiału w zakresie obciążeń termo-mechanicznych. Rozdział ten mógłby być bardziej rozbudowany, zawierający dodatkowo analizę rekomendowanych procedur badawczych w [1] ASTM E2714 - 13(2020) Standard Test Method for Creep-Fatigue Testing oraz [2]

ASTM E2368 - 10(2017) Standard Practice for Strain Controlled Thermomechanical Fatigue Testing. Wyraźnie brakuje podsumowania przeglądu literatury, który powinien prowadzić do celu pracy.

3.3.3. Rozdział 2. Badania doświadczalne.

Z przeglądu prac cytowanych wynika, że wyniki prac doświadczalnych zaczerpnięto z pracy doktorskiej autorstwa R. Skocki, pt. „Badanie wpływu temperatury podwyższonej na właściwości cykliczne stali P91” z roku 2016. W ocenianej pracy doktorskiej nie uwypuklono tego faktu wyraźnie. Na wstępie rozdziału 2 podano, że do identyfikacji parametrów modelu wykorzystano wyniki prób zmęczeniowych w warunkach obciążeń stało-amplitudowych izotermicznych a weryfikację przeprowadzono na podstawie niskocyklowych prób zmęczeniowych w warunkach obciążeń stało-amplitudowych nieizotermicznych. Jednakże, praca doktorska nie zawiera opisu badań eksperymentalnych w warunkach nieizotermicznych, a weryfikacja polegała jedynie na ocenie zachowania się modelu w symulowanych warunkach nieizotermicznych (podrozdział 4.6.3.).

W podrozdziale 2.1 opisano ogólną charakterystykę stali P91, licznie powołując się na dane zaczerpnięte z literatury. Podając między innymi zdjęcia mikrostruktury stali P91, ale bez skali. Zamieszczone zdjęcia przełomów dotyczą wyników z prób udarności, zamiast wykorzystanych próbek z przełomami po próbach zmęczeniowych. Umożliwiłoby to ocenę dominujących mechanizmów zniszczenia materiału P91 uzyskanych dla różnych temperatur prowadzenia testów. Dokładnie opisano wykorzystaną aparaturę i warunki prowadzenia badań.

W podrozdziale 2.4.1 poprawnie i wyczerpująco opisano badania przy kontrolowanej stałej amplitudzie odkształcenia całkowitego. Na podstawie podziału, uzyskanych charakterystyk zmienności rejestrowanych amplitud naprężenia, na trzy etapy, poprawnie zidentyfikowano charakterystyczne mechanizmy uszkodzeń zachodzących w materiale, co pozwoliło w dalszym etapie opracować model konstytutywny.

W podrozdziale 2.4.2. przedstawiono wyniki testów przy kontrolowanej amplitudzie naprężenia. Podrozdział ten niestety został chaotycznie zaprezentowany, w odmienny sposób niż rozdział poprzedni. Na przykład, (i) nie wyjaśniono co oznaczają podwójne wartości w kolumnie z amplitudami naprężeń z tabeli 7; (ii) na rysunku 29, oś liczby spadku liczby cykli do zniszczenia podano w pionie, odwrotnie niż w poprzednich rysunkach i oznaczono małą literą n – nie zdefiniowana co oznacza ‘spadek’ liczby cykli; (iii) rysunek 31 powinien przedstawiać zmianę odkształcenia maksymalnego w cyklu, a wykres przedstawia przebieg maksymalnego odkształcenia a nie jego zmianę. Bardziej poprawna byłaby osobna analiza zmienności amplitud odkształcenia całkowitego i osobna analiza wartości średniej odkształcenia w kolejnych cyklach. Pierwszy parametr określa osłabienie izotropowe materiału a drugi cykliczne pełzanie, co należałoby powiązać z osobnymi mechanizmami uszkodzenia zachodzącymi w materiale.

Doktorant nie wyraził krytycyzmu i wątpliwości, co do analizowanych danych eksperymentalnych. Na przykład, (i) jak wyjaśnić zarejestrowaną ujemną wartość maksymalnego odkształcenia całkowitego dla temperatury badań $T=600\text{ }^{\circ}\text{C}$? Jaki mechanizm za to odpowiada, a może błąd pomiarowy? Próba prowadzona przy kontroli naprężenia w cyklu o zerowej wartości średniej, zatem skąd ujemne wartości odkształcenia maksymalnego? (ii) na rysunkach 37, 40 oraz 41 wyraźnie widać niepoprawnie kontrolowaną amplitudę naprężenia – pierwszy cykl obciążenia ma wyższą amplitudę od pozostałych nawet o 10%, jaki to ma wpływ na trwałość?

3.3.4. Rozdział 4. Modelowanie konstytutywne

Treść rozdziału 4 to największe osiągnięcie doktoranta i stanowi rdzeń pracy. W pierwszych podrozdziałach Doktorant opisuje ogólne założenia modelu i dokonuje dekompozycji tensora odkształcenia. Proponowany model uwzględnia szereg ważnych czynników sprzężonych ze sobą, takich jak (i) umocnienie kinematyczne poprzez model Armstronga-Fredericka z dekompozycją na dwa składniki wg propozycji Chaboche'a; (ii) umocnienie/osłabienie izotropowe wg propozycji Chaboche'a również rozłożone na dwa składniki odpowiadające różnym etapom osłabienia materiału (etap I i II); (iii) wpływ temperatury poprzez uzależnienie parametrów umocnienia kinematycznego i izotropowego od temperatury; (iv) stan uszkodzenia poprzez uzależnienie potencjału dyssypacji od skalarnej zmiennej uszkodzenia izotropowego wg propozycji L.M. Kachanova (1958).

W dekompozycji tensora odkształcenia doktorant wprowadza dodatkowe składowe wymagające głębszego wyjaśnienia. Według opisu składowa odkształcenia odwracalna ε_{ij}^{ed} wynika z osłabienia sztywności materiału wskutek rozwoju uszkodzeń, natomiast składowa odkształcenia nieodwracalna ε_{ij}^{id} powstaje w wyniku uszkodzenia materiału. Wymaga to wyjaśnienia, ponieważ obie składowe odwołują się do uszkodzenia materiału, ale ich efekt jest całkiem inny (odwracalny i nieodwracalny). Jak to wyjaśnić?

W pracy przyjęto, że naprężenie wsteczne X_{ij} jest sumą dwóch składników przedstawionych przez równania (14) i (15), których zapis odbiega od równania (11). Wprowadza to pewien chaos w analizie pracy, dopiero równanie (43) wyjaśnia znaczenie dodatkowych zmiennych α_{ij} .

Opis efektu unilateralnego (strona 61) jest zasadny, ale należy wyraźnie zapisać, że efekt ten finałowo nie został wprowadzony do analizowanych wersji modeli konstytutywnych.

Z treści rozdziału 4 nie wynika do końca, które elementy modelowania są przyjęte z literatury (poza oczywistymi odnośnikami do literatury), ale które są oryginalnym wkładem doktoranta.

Rozdział 4 jest nierówny w jakości opisu, niektóre fragmenty są bardzo dobrze opisane (podrozdział 3.1, fragmenty podrozdziałów 3.2 i 3.3) a niektóre bardzo ogólnie i nieprecyzyjnie.

Brakuje podsumowania, jakie wersje modelu konstytutywnego będą zaimplementowane, dowiadujemy się o tym w następnym rozdziale i to dopiero na stronie 78 z tabelami precyzującymi parametry modeli.

3.3.5 Rozdział 4: Wyniki numeryczne.

W rozdziale tym opisane schemat numerycznej implementacji ogólnego modelu konstytutywnego. Zamieszczono też schemat algorytmu numerycznego i opisano procedurę identyfikacji parametrów modelu. Według wyników identyfikacji parametrów modelu zamieszczonych w tabelach 13-15 wynika, że proces identyfikacji przeprowadzono osobno dla każdej zaimplementowanej amplitudy odkształcenia całkowitego. Jeśli tak, to praktyczne zastosowanie modelu jest ograniczone. Parametry modelu powinny być niezależne od poziomu obciążenia.

Jak uzasadnić możliwość symulowania przemieszczanie się pętli histerezy wzdłuż osi odkształcenia (Rys. 68)? Który element modelu odpowiada za ten efekt?

4. Podsumowanie

Praca doktorska poza niedoskonałościami wymienionymi szczegółowo w analizie poszczególnych rozdziałów jest wartościowym opracowaniem. Przede wszystkim, praca podejmuje bardzo ważny i trudny problem modelowania zachowania się materiału przy obciążeniach zmiennych termo-mechanicznych. Poprawne modelowanie kumulacji uszkodzeń i ich wpływu za zdolność materiału do przenoszenia obciążenia jest istotne w procesie efektywnego projektowania i prognozowania trwałości konstrukcji narażonych na zmiennie obciążenia termo-mechaniczne. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą i umiejętnością modelowania konstytutywnego z uwzględnieniem sprzężonych mechanizmów odkształcenia plastycznego, kumulacji uszkodzeń z uwzględnieniem zmienności temperatury. Zaproponowany model uwzględniający szereg wymienionych sprzężonych czynników jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego prognozowania zachowania się materiały przy zmiennych obciążeniach termo-mechanicznych.

5. Wniosek końcowy

Wymienione osiągnięcia przedstawiają, w dziedzinie Nauk Technicznych, oryginalny wkład doktoranta w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna.

W związku z powyższym stwierdzam, że praca spełnia wymagania „Ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 roku i może być dopuszczona do publicznej obrony przed Radą Naukową Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej.

*Abdusalam
Khan*