

Recenzja Rozprawy Doktorskiej pana mgr Ved Prakash Dubey

pt. "Yield surface identification of functional materials and its evolution reflecting deformation history under complex loading"

1. Aktualność tematyki

Rozprawa doktorska Pana Dubey została wykonana na stanowiskach pomiarowych Zakładu Mechaniki Eksperymentalnej IPPT PAN pod kierunkiem profesora Zbigniewa Kowalewskiego. Promotorem Pomocniczym jest dr hab. Maciej Kopec.

Mimo, że Doktorant pochodzi z innego kręgu kultury technicznej i cywilizacyjnej, udało mu się nawiązać do tradycji naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki i zrewaloryzować oraz udoskonalić osiągnięcia i narzędzia naukowe opracowane w Zakładzie Mechaniki Eksperymentalnej.

Oznacza to, że tematyka podjęta przez doktoranta jest spójna z dotychczasową nagromadzoną wiedzą aktualnymi badaniami prowadzonymi w Zakładzie Mechaniki Eksperymentalnej z jednej strony a z drugiej wychodzi naprzeciw wyzwaniom naszej zachodniej cywilizacji w której potrafimy projektować i wykonywać w skali przemysłowej złożone, ukierunkowane, sztuczne materiały konstrukcyjne – nigdzie nie występujące w przyrodzie. Takie materiały jak: meta-materiały, bi-metale, stale drukowane i inne wytwarzane addytywnie wymagają rozpoznania, ustalenia własności i cech charakterystycznych. Te nowe materiały potrzebują nowych hipotez wytężenia oraz badań eksperymentalnych nad powierzchniami plastyczności silnie ewoluującymi pod wpływem historii deformacji.

Ta tematyka na gruncie meta-materiałów i metali drukowanych, praktycznie, oprócz Zakładu Mechaniki Eksperymentalnej, nie jest podejmowana w literaturze. Przeszkodą i wielkim wyzwaniem nie jest brak narzędzi matematycznych i eksperymentalnych, lecz stworzenie stanowiska badawczego wydzielającego z gęstwiny zjawisk - tego zjawiska, które jest kluczowe i nijako rządzi zachowaniem materiałów addytywnie wytwarzanych. Taki eksperyment nazywany w literaturze eksperymentem benchmarkowym, gdyż jest on powtarzany we wszystkich laboratoriach a ponieważ jest klarowny w swym ujęciu to jest przedmiotem numerycznych symulacji w całej Europie. Taki eksperyment zawsze będzie referencyjny dla porównań różnych modeli i koncepcji wytężenia.

Trzeba od razu powiedzieć, że na tle odkryć doktoranta, spotykane w literaturze różne próby opisu ewolucji powierzchni plastyczności za pomocą wzmocnienia izotropowego i kinematycznego są zaledwie niedoskonałym punktem startowym do prawdziwych badań, a z uwagi na anizotropię i nieliniowość może nawet stanowić zbędną rupieciarnię, zbędny balast intelektualny przeszkadzający stawiać śmiało hipotezy. Pomysłem promotora i doktoranta jest przedstawienie kluczowych ścieżek obciążenia wieloparametrowego w benczmarkowym eksperymencie. Eksperyment ten jest zbudowany w ten sposób, iż pozwala na wypełnienie i zweryfikowanie treści modelu anizotropowej ewolucji powierzchni plastyczności. Model matematyczny tej ewolucji już wcześniej był zaproponowany w Zakładzie Mechaniki Eksperymentalnej przez prof. Szczepińskiego i sprawdził się w przypadku niektórych tradycyjnych metali.

Tym samym, problematyka rozprawy doktorskiej mgr Dubey jest aktualna i oryginalna. Jest również świetną rewaloryzacją pionierskich osiągnięć szkoły IPPT w dziedzinie badań eksperymentalnych nad złożonym (rozciąganie-skręcanie) stanem obciążenia.

2. Zakres badań i prezentacja wyników

Schemat rozprawy, sposób przeprowadzania badań i ich prezentacja nawiązują do tradycyjnych wzorców – stąd bierze się łatwość czytania i studiowania dla czytelnika znającego fundamenty mechaniki ośrodków ciągłych. Doktorant stosuje oznaczenia europejskie.

Organizacja pracy jest taka, że doktorant zbudował oryginalne stanowisko badawcze zezwalające na jednoczesną dwukierunkową deformację (rozciąganie i skręcanie) pręta badawczego. Na tym stanowisku badał cztery różne materiały – próbki CRTi (rozdział 5); próbki CP-Cu (rozdział 6), próbki bimetalu Ti-Cu (rozdział 7) i próbki stali SS316L (rozdział 8).

Doktorant, aby oszczędzić materiału opracował oryginalną metodę pomiaru ewolucji powierzchni plastyczności. Powierzchnię plastyczności przedstawiał w postaci płaskiego przekroju bryły granicznego wyężenia płaszczyzną $\sigma_2 = 0$. Mimo, iż schemat badań w przypadku każdego z badanych materiałów był ten sam lub prawie ten sam to wyniki i dyskusje wyników mają swoją specyfikę i w poszczególnych rozdziałach się znacznie różnią.

We wszystkich badaniach Doktorant swe prace rozpoczynał od jednoparametrowych obciążeń (czyste ściskanie, czyste rozciąganie i czyste skręcanie w obie strony). Następnie w jednoosiowym rozciąganiu sprawdzono procedurę krokowego wyznaczania ewolucji granicy plastyczności a następnie wyznaczono początkową granicę plastyczności. Z założenia winna być ona symetryczna, jednak nie zawsze tak było – Doktorant uzyskał tu pierwsze ważne wyniki. Następnie, Doktorant prowadził obciążenie po ścieżkach gdzie wyznaczał ewolucję powierzchni plastyczności próbki poddanej pewnej wstępnej pre-deformacji plastycznej. Uzyskał tu olbrzymia ilość przypadków które składał w procesy ewolucyjne i porównywał z ewolucją powierzchni HHM.

Rozdziały 5,6,7,8 są zasadnicze. Pozostałe rozdziały rozprawy, kompletują prezentację; są zgodne z tradycją oraz nie wymagają komentarza.

3. Ocena wyników rozprawy

3.1. (rozdział 5-6) Na rysunku 5.3 pokazano odkrycia związane z monotonicznym rozciąganiem złożonym z harmonicznym skręcaniem – widać że większa częstość skręcania przy tej samej amplitudzie radykalnie wpływa na „ewolucję powierzchni plastyczności”. Recenzent ma wrażenie że tego typu eksperyment przerasta możliwości modelu Szczepińskiego w którym nie ma makronaprężeń typu „couple” generowanych przez oscylację ścinania. Może lepsza była by tu powierzchnia plastyczności Sawczuka. W każdym razie różnice są znaczące i warto się zająć tym efektem.

Inaczej mówiąc, gdyby doktorant chciał zasymulować przy pomocy modelu Szczepińskiego wyniki uzyskane na rys 5.11 b i porównać je z wynikami na rys 5.11 d (częstość dwukrotnie większa) to prawdopodobnie nie uzyskałby tak silnego rozróżnienia krzywych powierzchni plastyczności jakie występują na tych dwóch rysunkach.

Interesującym jest sposób w jaki były obliczane naprężenia „Axial Stress” przedstawione na rys 5.3 oraz na rys 6.2.?

3.2. (rozdział 7) Interesujące są odkrycia doktoranta w zakresie własności bimetalu w tym przypadku drukowanego tytanu i miedzi. Moduł Younga obu materiałów niezależnie branych wykazuje kierunkowość, taką kierunkowość posiada również bimetalecz tytan dominuje (tab.7.11). Uśredniony moduł Younga natomiast zbliża się do parametrów miedzi. Szkoda, że na krzywą naprężenie-czyste odkształcenie (fig.7.5) nie naniesiono krzywych z czystego jednoosiowego rozciągania. Czytelnik nie ma szansy porównania skali wpływu naprzemiennego skręcania.

Niezwykle ważne są doniesienia o tym że złożenie dwóch materiałów z których każdy jest dobrze opisywany hipotezą jednoparametrową HMH, daje bimetalecz który po wstępnym rozciągnięciu 0.01% ma inną granicę plastyczności na rozciąganie (221 MPa), ściskanie (-200 MPa) i skręcanie (141 MPa). Ten fakt nie może być pominięty milczeniem - wymusza on konieczność zmiany dotychczasowej hipotezy jednoparametrowej na hipotezę trójparametrową. Doktorant zaznacza (strona 128), że w praktyce jest jeszcze gorzej bo nawet stan początkowy wyężenia jest wieloparametrowy i potrzebuje hipotez wytrzymałości anizotropowej (fig. 7.13). W tabelach opisyjących anizotropową ewolucję przedstawia 5 parametrów (eksperymentalnych) – czy sugeruje to, iż model Szczepińskiego należy zredukować do hipotezy 5 parametrowej ?

Innymi słowy, dalsze posługiwanie się hipotezą HMM, nawet na poziomie projektowym, jest błędne i powinno być zastąpione hipotezą trójparametrową (np. Burzyńskiego), czteroparametrową, etc. Projektanci powinni pamiętać prawa fizyki wypowiedziane w sposób zwarty; iż konstrukcja zaprojektowana na hipotezę HMH jest bardziej bezpieczna niż konstrukcja zaprojektowana na hipotezę Coulomba-Mohra, zaś konstrukcja zaprojektowana na hipotezę Burzyńskiego jest bardziej bezpieczna niż ta zaprojektowana na hipotezę HMH. Nauka rozwija się bowiem w stronę coraz bardziej bezpiecznych hipotez.

Wartościowe są „nieobrobione” wyniki zamieszczone w rozdziale 7.3.5 pokazujące na poszczególne stany ewolucji anizotropowej powierzchni plastyczności. Pokazywanie wyników „nieobrobionych” (w rzeczywistych wymiarach) ma tę zaletę, że mogą one w przyszłości służyć do kalibracji modelu anizotropowej plastyczności Szczepińskiego.

Pionierskie wskazówki doktoranta jak zmienia się powierzchnia plastyczności (strona 135) są bezcenne ponieważ wyływają z danych eksperymentalnych a nie z analitycznych badań

Rozdział 7.3.6. pokazuje, że doktorant potrafi się oderwać od fenomenologii i opisywać przyczyny ewolucji anizotropowej w języku krystalografii opierającej się o coraz dokładniejsze pomiary w skali atomowej. Pokazuje to na dobre przygotowanie Doktoranta do „metalurgii” - takie przygotowanie jest, zdaniem Recenzenta, nieodzowne, bowiem drukowanie metali nie jest przecież zabawą w „stwarzanie z niczego” (*creatio ex nihilo*) lecz profesjonalnym projektowaniem struktur opartym na pewnej (solidnej) wiedzy a nie na grząskiej intuicji.

3.3. (rozdział 8) Analogiczne efekty do bimetalu, wywołuje sposób drukowania metalu wykazujący kierunkowość – doktorant zbadał cztery przypadki drukowanej stali w rozdziale 8. Pokazuje on na rysunku 8.7 opracowany przez niego cykliczny sposób (obciążanie - odciążanie) znajdowania ewoluującej powierzchni plastyczności. Wynik pokazany na rysunku 8.7 odnosi się wprawdzie do jednoosiowego rozciągania, lecz wskazuje poprawność opracowanej przez doktoranta metody eksperymentalnego wyznaczania ewoluującej powierzchni plastyczności. Okazuje się, że drukowane metale 316L, zezwalają na przedłużenie koncepcji krokowego wyznaczania powierzchni plastyczności. Mamy tu pewną analogię z odkryciem Lode’go, który opracował tę metodę dla rurek obciążonych ciśnieniem wewnętrznym i siłą osiową.

Podobnie jak w poprzednich trzech materiałach, aby pokazać anizotropową ewolucję powierzchni plastyczności doktorant umieszcza ją na tle izotropowej ewolucji powierzchni plastyczności HMM. Pozawala to na oceny ilościowe oraz, prawdopodobnie w przyszłości na oceny numeryczne wykonane modelem Szczepińskiego. Szkoda, że charakterystyka naprężenie –rozciąganie pokazana na rys 8.11 jest obcięta i nie są pokazane największe różnice między wszystkimi czterema kierunkami. Można by z tego wnioskować jakie rodzaje druku są lepsze a jakie mniej wskazane. Zakładamy, że wcześniej cytowany rysunek 8.7 obejmujący cztery przypadki całościowo, nie wskazuje od razu na potencjalne znaczne różnice w ewolucji anizotropowej.

Pomysł aby te anizotropie ocenić syntetycznie w tab. 8.3 za pomocą pewnych „integralnych” wielkości, należy ocenić pozytywnie. Na tablicy tej widać liczbowo (bezdyskusyjnie) różnicę ewolucji we wszystkich czterech przypadkach – prawdopodobnie tę tablicę będą w przyszłości cytować numerycy, a publikacja doktoranta i promotorów osiągnie wysokie wskaźniki.

Rys 8.13 stanowi syntetyczne zebranie wyników Doktoranta – wskazują one na niewątpliwą anizotropową ewolucję powierzchni plastyczności w każdym z czterech kierunków drukowania stali 316L. Wnioski są bogate i wskazują na wrażliwość materiałów drukowanych na pre-deformację plastyczną.

Przedstawione wyniki są pionierskie i, jak z nich wynika, ważne dla ustanowienia, nowej dyscypliny naukowej jaką jest termo-plastyczność materiałów drukowanych. W tym

kontekście ciekawym jest, czy możliwe jest przedłużenie kąta anizotropii o którym mowa w rys 8.14d na przypadek ogólny - trójwymiarowy.

Bogactwo opisu i porównań, jakie można znaleźć w tekście rozprawy, wskazuje na „zdziwienie badawcze” doktoranta – czytelnik czuje jego fascynację swoimi odkryciami, pasję i chęć odkrycia kolejnych tajemnic przyrody.

Wydaje się, że doktorant posiadał dobry warsztat pisarski, zna rzemiosło badawcze i ma talent w prezentowaniu wyników.

4. Wniosek końcowy

Po zapoznaniu się z rozprawą mgr inż. Dubey stwierdzam, że przedstawiona Radzie Naukowej IPPT PAN rozprawa spełnia wszystkie kryteria, zarówno te tradycyjne – środowiskowe - jak i te formalne - przewidziane w Ustawie o Stopniach i Tytule. Moja opinia jest pozytywna, stąd zgłaszam wniosek do Rady Naukowej IPPT PAN w Warszawie o niezwłoczne dalsze procedowanie doktoratu.

Jednocześnie, z uwagi na takie cechy wyróżniające recenzowany doktorat jak:

- opracowanie i wdrożenie oryginalnej procedury otrzymywania powierzchni plastyczności w dwu-kierunkowym stanie naprężeń
- opracowanie i wdrożenie koncepcji pomiaru anizotropowej ewolucji powierzchni plastyczności w trakcie pre-deformacji plastycznej
- rozwinięcie metod eksperymentalnych metali drukowanych
- osiągnięcie pionierskich rezultatów eksperymentalnych wskazujących na konieczność budowy nowych hipotez wyciężenia,

zawracam się do szanownej Rady Naukowej z propozycją wyróżnienia (*cum laude*) recenzowanej rozprawy doktorskiej.