

Recenzja habilitacji Pani dr inż. Teresy Frąś

1. Znaczenie tematyki rozprawy habilitacyjnej.

Habilitacja Pani Teresy Frąś powstała w latach 2013-2022 podczas jej pracy w Franko-Germańskim Instytucie badawczym w Saint-Louis we Francji. Oznacza to, że rozprawa habilitacyjna powstała w oparciu o narzędzia eksperymentalne, analityczne i numeryczne tej placówki. W tym sensie, Habilitantka przywołuje na myśl postać Marii Skłodowskiej, na którą dziś, na nowo czeka ciągle Nauka Polska.

Wyniki przytaczanej pracy habilitacyjnej przedstawione są w postaci zbioru 9 publikacji, drukowanych głównie w renomowanym czasopiśmie, jakim jest: Journal of Impact Engineering. Wszystkie publikacje przeszły już swój cykl recenzowania, dlatego też, w niniejszej recenzji ograniczę się do analizy prezentowanych wyników, z punktu widzenia „wkładu do nauki” i „oryginalności osiągnięcia naukowego”.

Francuzi, od czasów Karola Młota i generała Lazara Carnot, rozumieją i wiedzą jak winno przebiegać przygotowanie do obrony militarnej kraju. Tym bardziej cieszy fakt, iż Habilitantka ma za sobą francuskie, dziewięcioletnie doświadczenie w temacie tak niezwykle ważnym dla obronności. Z wiedzą i doświadczeniem przedstawionym w jej pracy habilitacyjnej, mogłaby zasilić szeregi ważnych urzędników Ministerstwa Obrony naszego kraju. Analizując jej sposób pracy, uważam, że byłaby w stanie stworzyć tam zaczątek, zespół wykwalifikowanych ludzi, myślących pozytywnie i działających kompetentnie na rzecz obronności militarnej naszego kraju.

Dzisiaj, w obliczu aktualnie istniejących na świecie zagrożeń militarnych, temat jej rozprawy habilitacyjnej jest niezwykle ważny. Praca dr Teresy Frąś, mogłaby stać się załącznikiem pozytywnego i należytego ukierunkowanego myślenia o obronności naszego państwa.

Temat, tak odważnie podjęty przez Habilitantkę, jest niewątpliwie szansą na rozwój Nauki Polskiej w tej dziedzinie, a badania przedstawione przez habilitantkę są wartościowym działaniem. Jak wykazuje pośrednio rozprawa habilitacyjna Pani dr Teresy Frąś, obronność jest niezwykle trudnym obszarem działań naukowych, miejscem, które potrzebuje wyjątkowych pomysłów, olbrzymiej wiedzy i intuicji badawczej oraz niemniej nowoczesnych narzędzi badawczych. Obronność i bezpieczeństwo militarne to najtrudniejsze wyzwania naukowe, stąd tym bardziej wyrażam mój szacunek dla doktorantki i wybranego przez nią tematu.

2. Charakter osiągnięcia naukowego.

Kandydatka przedstawiła dziewięć publikacji zawierających wyniki jej badań przeprowadzonych w placówce w Saint-Louis w ciągu ostatnich dziewięciu lat. Przedstawione tu szerokie spektrum prac jest znakomite. Zwraca uwagę ilość wysiłku twórczego kandydatki oraz jej pracy eksperymentalnej, analitycznej i numerycznej. Niezwykłym osiągnięciem jest tu spójne przeplecenie badań eksperymentalnych i numerycznych, powtarzających się w badawczym cyklu, pogłębiającym zrozumienie mechanizmów fizycznych oraz prowadzących do optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych. Trzeba bowiem pamiętać, iż cel użyteczny jakim jest najsprawniejsza i skuteczna obrona obiektu militarnego (zoptymalizowane opancerzenie), dominuje nad całością poczynąń badawczych dr Frąś.

Wszystkie jej prace mają jednolitą, jasną, tę samą metodologię badawczą. Przy pomocy narzędzi analitycznych obmyśla najpierw stanowisko badawcze do ilościowego pomiaru spodziewanego efektu obronnego, potem konstruuje stanowisko badawcze w tym przypadku zorientowane na zjawiska o wysokich prędkościach przebiegu, deformacji i ciągłego rozrywania. Następnie wykonuje serię eksperymentów. Są one później modelowane i analizowane. Ostatnim elementem cyklu są wnioski dla projektantów, producentów oraz wskazówki co do korekty stanowiska badawczego. Całość zamykają nowe pomysły, biorące się z najlepszych, optymalnych rozwiązań i odkrytych cech fizycznych.

3. Trzy prace zespołu : Frąś – Roth – Mohr: kalibracja

Weźmy tak jak proponuje Kandydatka, pierwsze trzy publikacje napisane w tercecie autorów: „Frąś-Roth-Mohr” - mają one wspólny mianownik jakim są dodatkowe badania kalibrujące model obliczeniowy dla jednego wspólnego dla pocisku i płyty ochronnej materiału jakim jest stal pancerna o podwyższonej wytrzymałości Mars@300.

W każdej z trzech prac wykonano inne weryfikacje modeli - w pierwszej pracy z 2018 roku, użyto sześć charakterystycznych próbek i wykonano sześć charakterystycznych testów (LT, NT10, Mini Punch specimen, SH specimen i MB – bending specimen) – co oznacza, że będzie można, w oparciu o sześć charakterystycznych wielkości granicznych, zbudować model lepko-plastycznego zniszczenia co najmniej sześcioparametrowy. Każdy z tych eksperymentów wymaga osobnego stanowiska eksperymentalnego (patrz rys 2 str. 150) Nie tylko chodzi tu autorce o anizotropię wywołaną kierunkiem walcowania, chociaż prowadzi eksperymenty dla trzech kierunków obróbki. Taką anizotropię utrzymuje tylko w prawie plastycznego płynięcia w postaci trzech dodatkowych współczynników „G” wyznaczenie których wymaga serii pomiarowych w trzech różnych kierunkach anizotropii.

Opisywany obszar lepko-plastycznego płynięcia, jest modelem własnym, w którym stała graniczna nie jest stałą, lecz multiplikatywną funkcją Johnsona-Cooka trzech wielkości (izotropie hardening): efektywnego odkształcenia plastycznego, jego prędkości i temperatury. Model potrzebuje wykalibrowania trzech stałych Swifta, trzech stałych Voce oraz jednej stałej temperaturowej i jednej stałej Taylora-Quinney’a - czyli razem 8 stałych. Habilitantka nie pokazuje jak dokonuje kalibracji – uznając ten etap pracy jako znany z literatury i przez nią udokumentowany. Szkoda, że nie są pokazywane wyniki numeryczne dla testów SH, inne niż oklepiane jednoosiowe rozciąganie. Powtórnie szkoda, bo kalibracja 8 stałych to trudne zadanie naukowe, jak pokazuje literatura jest ono błędnie rozwiązywane przez azjatyckich badaczy.

4. Komentarz pierwszy

W sprawie rodzajów i ilości eksperymentów kalibrujących model, mam parę słów komentarza, jako badacz zdający sobie sprawę, że reprezentuje kulturę i naukę polską, która od 30 lat niewiele wniosła do cywilizacji technicznej Zachodu. W kwestii dziedziny, którą określa się jako: „teoria wyężenia materiałów”, chciałbym zwrócić uwagę, że mamy tu akurat własne fundamenty. Nie jesteśmy jedynie marnymi kopistami i konsumentami naukowych osiągnięć Zachodu. Tę dziedzinę stworzył Tytus Huber wraz z uczniem Włodzimierzem Burzyńskim, ustanawiając ją jako naukę analityczną 3D, wyraźnie odróżniającą się od analityczno-eksperymentalnej teorii wytrzymałości, założonej w 1638 roku przez Galileusza. To Huber i Burzyński a potem następcy Krzyś i Życzkowski z Krakowa zwracali uwagę, iż poprawnie jest mówić „hipoteza wyężenia” a nie „hipoteza wytrzymałości”. Bowiem, teoria wyężenia jest nauką racjonalną, podobną do teorii sprężystości czy teorii ośrodków sypkich, a wytrzymałość jest dziedziną wiedzy doksalnej typu hydraulika, mechanika pojazdów, energetyka, etc. W ostatnim czasie, do rewaloryzacji pojęcia „teorie wyężenia” przyczynił się znakomicie profesor Ryszard Pęcherski.

Jest prawdą, że klastyczne metody eksperymentalne związane z teorią wyężenia ograniczają się do jednowymiarowego rozciągania i jednowymiarowego ściskania. Te próby dostarczają danych wystarczających dla niektórych metali obciążanych statycznie w sposób nieinwazyjny. W przypadku pewnych rzadko spotykanych rodzajów obciążeń, typu cięcie metali, zimna obróbka plastyczna, czy – jak w Pani przypadku – przecinanie materiału, klasyczne dane graniczne typu granice na jednoosiowe rozciąganie/ściskanie/skręcanie nie są wystarczające, gdyż słabo wychwytyują specyfikę odpowiedzi materiału na obciążenie typu przebicie. Nawet próba czystego ścinania, wprowadzie lepsza, jest tu mało zadawalająca. Intuicyjnie czujemy, iż potrzebna jest tu wielkość materiałowa typu „toughness” związana z krytyczną (graniczną) energią pękania przy rozdzieraniu [J/m^3]. Jest ona wielokrotnie istotniejsza niż granica na jednoosiowe rozciąganie. Teoria wyężenia nam to nie tylko podpowiada ale i dowodzi.

Prawdopodobnie stanowisko do pomiarów toughness nie było Pani dostępne w tak dobrze, skądinąd, wyposażonym laboratorium i stąd trzeba było ograniczyć się do pomiarów LT, NT10, Mini Punch, SH i MB. Innym pomiarem dostarczającym danych do zadawalającego modelu przebicia byłby pomiar „łupliwości” (cleavageness). Nie można jej lekceważyć w modelowaniu wyężenia materiału przebijanego. Prawdopodobnie w Pani środowisku lekceważy się modele oparte na łupliwości. Podobnie ważnym jest pomiar spójności (cohesivness). Oparte na nim są ciekawe modele wyężenia, również te wykorzystujące inną ważną cechę jaką jest twardość (hardness). Wprowadzie podaje Pani wartości tej wielkości granicznej dla Mars@300, ale nie pisze Pani jak poprawnie należy tę wielkość wykorzystać w budowie modelu wyężenia materiału przebijanego. Podsumowując ten wątek, można mieć wrażenie, że nigdzie w Pani modelu twardość nie jest wykorzystywana.

W ośrodku gdańskim, w przeszłości, wykorzystywaliśmy do modelowania przebijania inne, dużo ważniejsze dane niż jednoosiowe rozciąganie. W stanach granicznych, mierzyliśmy kruchość (brittleness); adhezyjność (adhesivness); gumowatość (gumminness); żujność (chewiness); odbojność (resilience). Stąd mam przekonanie, że w oparciu o takie dane jak elasticity, toughness, cleavageness, cohesivness, hardness, brittleness, adhesivness, gumminness, chewiness, resilience a nie o dane LT, NT10, Mini Punch, SH i MB, należy budować hipotezę wyężenia materiału przebijanego.

Proszę zauważyć, iż powyżej wymienione mierzalne parametry stanowią dziesięć parametrów określających graniczne stany materiału. Stąd hipoteza wyężeniowa mogła być nawet dziesięcioparametrowa. Te dane materiałowe mają jeszcze jedną ważną dla teorii wyężenia cechę [nie mają jej LT, NT10, Mini Punch, SH i MB] - są one wyrażone w jednostkach energii i stanowią wartość energii krytycznej danego stanu. To wspaniała okazja aby powrócić do fundamentalnego wzoru Hubera z 1903 roku stwierdzającego: „**wyężyć tak aby wytrzymać**” w sposób matematyczny: $\Phi \leq K$ gdzie stan wyężenia określa się pewną energią wyężenia Φ a stan granicznej wytrzymałości pewną energią krytyczną K . Łatwo sobie wyobrazić, iż energia krytyczna w przypadku hipotezy wieloparametrowej będzie funkcją poszczególnych energii granicznych wyznaczonych eksperymentalnie.

Nauka Zachodu dawno już odeszła od tego fundamentalnego sposobu myślenia, biorącego się przecież z genialnego pomysłu Maxwella. Również Francuzi nie posługują się teorią wyężenia opartą o różne energie krytyczne, stąd też bierze się, jak myślę, praprzyczyna stosowanej przez Panią metodologii. Ponieważ stoję na gruncie polskiej tradycji naukowej Hubera, Burzyńskiego i Szewalskiego, to nie porywa mnie do końca, zastosowana przez Panią metodologia. Przypominam Pani, że w Warszawie jest profesor Pęcherski i jego uczniowie, którzy walczą o analityczne a nie komputerowe wyznaczanie hipotez wyężenia – bo wtedy okazuje się jakimi walorami podejście energetyczne góruje nad komputerowym.

5. Trzy pierwsze prace – kalibracja - ciąg dalszy

Wiadomo, że model Johnsona-Cooka w wersji oryginalnej nie opisuje etapu zniszczenia - stąd aby uzyskać efekt przebijania pocisku przez płytkę, autorzy dodają model zniszczenia Hosforda-Coulomba. Kryterium zniszczenia, które opracowuje Kandydatka jest odkształceniowym kryterium mówiącym, iż zlokalizowanie, zainicjowanie i rozwój pęknięcia jest funkcją ekwiwalentnego odkształcenia krytycznego. Słusznie Autorka buduje wyrażenie na te krytyczne odkształcenie jako funkcję zależną od: lokalnej temperatury, od wielkości niezmienników odkształcenia takimi jak pierwszy, drugi i trzeci niezmiennik; a także od niezmienników pola naprężeń (uwzględniania jest anizotropia indukowana) w postaci „parametru trójosiowości”, „kąta Lodego” i intensywności naprężeń $\sqrt{3J_2}$. Z niewyjaśnionych czytelnikowi powodów Kandydatka ukrywa przed nami istnienie drugiego niezmiennika naprężeń oraz istnienie drugiego niezmiennika tensora odkształceń, enigmatycznie mówiąc tylko o „an equivalent plastic strain”. Ekwiwalentne do czego ?

6. Komentarz drugi

Pomijanie roli drugich niezmienników tensora naprężeń i odkształceń jest chyba błędne, bowiem zawęży się tym samym typ geometryczny pęknięcia materiału.

Całkowicie pominięta jest dyskusja problemu, który należałoby sformułować następująco: czy budując teorię wyężenia materiału przebijanego należy wprowadzić nowe parametry wychwytyjące istotę rzeczy, czy też wolno do tego celu „skopiować” znaną w literaturze teorię wyężenia materiałów walcowanych na zimno. Ta ostatnia, jak wiadomo, opiera się na „parametrze trójosiowości”, „kącie Lodego”. Dlaczego dla mechanizmu zniszczenia podczas przebijania jest ważny kąt Lodego i pierwszy niezmiennik - tego Kandydatka nie analizuje, ani nie pokazuje w wynikach obliczeń jak wprowadzenie tych parametrów, wziętych przecież z innego zjawiska, wpływa na przebieg pęknięcia.

Osobiście nie jestem przekonany, iż takie bezpośrednie przeniesienie wyników teorii wyężenia materiałów walcowanych na teorie wyężenia materiałów przebijanych jest zasadne. Wprowadzenie kąta Lodego i trójosiowości, wymaga trzech nowych stałych a, b, c , które trzeba kalibrować dla użytego materiału Mars@300 i powoływanie się na pracę Lemaitre'a nic tu nie da.

Chciałbym skomentować motywacje dla użycia kąta Lodego, aby pokazać jaki był pierwotny cel wprowadzenia przez Lodego parametru γ . Badania Lodego nie dotyczyły bowiem wyężenia materiału przebijanego, czy walcowanego a jedynie materiału w którym jednoosiowe rozciąganie jest dominujące. Stąd zachodzi obawa, iż parametr Lodego tylko przypadkowo pasuje do innych modeli wyężenia. Pytanie wyjściowe jakie zadał sobie Lode brzmiało: czy modele wyężenia należy budować z, czy też, bez udziału drugiego naprężenia głównego σ_2 . Modele energetyczne Beltramiego, Hubera, Hencky takiego naprężenia potrzebowały, również model geometryczny (nieenergetyczny) Misesa te naprężenie potrzebował, natomiast modele wykreślnych obwiedni Treski i Mohra takiego naprężenia już nie potrzebowały.

Dlatego wszystkie modele pośrednie, które biorą tylko pod uwagę częściowy udział naprężenia σ_2 , będą sterowane wielkością parametru Lodego. Na bazie tego parametru w naszej gdańsko-olsztyńskiej grupce stworzyliśmy pojęcie: „stress shearness parameter” – ta nazwa idzie naprzeciw badaniom Bao-Wierzbickiego 2004, którzy wprowadzili pojęcie „stress triaxiality”. Ostatecznie trzy wielkości: „stress triaxiality”, „stress intensity” i „stress shearness”, moim zdaniem tworzą zestaw właściwych zjawisk dla opisu stanów granicznych: czy to pojawienia się granicy sprężystości, czy granicy plastyczności, granicy nośności czy też granicy pęknięcia. Moim zdaniem, nawet zniszczenie można opisywać energetyczną teorią wyężenia i nie narzekać, iż „podejście energetyczne się do zniszczenia nie nadaje”. W tym kontekście, łatwe sięganie po modele azjatyckie jest naganne, deprecjonujące dorobek całej Zachodniej Cywilizacji.

7. Właściwe wyniki prac zespołu Frąś-Roth-Mohr

Zarówno model Johnsona-Cooka jak i Hosforda-Coulomba zostały wykalibrowane przez Kandydatkę na sposób azjatycki, którego nie jestem entuzjastą. Autorka pokazuje wyniki (np. str. 155) tej kalibracji. Szkoda, iż użyto w niej wszystkich eksperymentów a nie zostawiono jednego na później - do sprawdzenia. W ten sposób mamy zgodność eksperymentu z obliczeniami, ograniczoną tylko do zgodności, która jest zgodnością tylko dokładności wyliczeń. Ogrom tych przedwstępnych eksperymentów jest godny podziwu i sama ta praca jest wystarczająca dla „poważnego wkładu do nauki światowej”. Przykładowo bardzo ciekawy jest wykres powierzchni granicznej odkształcenia pęknięcia (rys 8, str. 157) – jest to powierzchnia wklęsło-wypukła co jest zaskoczeniem i chyba nowością - niestety pozostawioną bez komentarza.

W metodologii naukowej przyjętej przez Kandydatkę dalej występują już zasadnicze eksperymenty w skali laboratoryjnej. Polegają one na wystrzeleniu pocisków przeciwpancernych do pancerza ochronnego. Nie mogę się odnieść do tej części pracy naukowej, bowiem nie jestem zwolennikiem nauki, w której 99 % środków przeznacza się na wyposażenie laboratoriów a 1 procent na badania analityczne i numeryczne. Stąd mój programowy sceptycyzm co do wyników eksperymentów laboratoryjnych (co innego pomiary *in situ* w elektrowni). Nie neguję wagi naukowej tych eksperymentów, nie umniejszam trudu i

talentu eksperymentatorów, nawet uważam, że sama część eksperymentalna może być podstawą do habilitacji. Jednak nie wierzę w ani jedną krzywą wyznaczoną eksperymentalnie.

Nie rozumiem też, z jakich powodów Autorka zamieściła elektronowe zdjęcie powierzchni pęknięcia (fig 15, str. 160). Zawierają one niewiarygodne, powierzchowne komentarze, po części uderzające i podważające autorski model – bowiem ten model nie zakłada różnego zachowania dla przypadku A (uderzenie w otwór) i przypadku B (uderzenie w materiał) – inaczej mówiąc model matematyczny jest niewrażliwy na miejsce w które uderzy pocisk. Tymczasem zdjęcia czy też nieudolny komentarz mówią, iż model jest „impact-dependent”. Zdjęcia może i by były w jakiś sposób przekonywujące gdyby dla porównania pokazano strukturę świeżej stali przekrojonej piłką i/lub laserem. Czytelnik nie ma więc punktu referencyjnego. Dodatkowo, zdjęcie wskazuje na obecność przejścia fazowego typu stapianie - a takie zjawisko w modelu nie było uwzględnione.

Wyniki badań eksperymentalnych są przedstawiane w sposób czytelny i przekonujący. Przebijane są płyty perforowane za pomocą różnych pocisków – wszystko jest zgodne z potrzebami militarnymi. Następnie Autorzy dokonują numerycznego modelowania eksperymentów i okazuje się że modele dokładnie opisują wielkości charakterystyczne eksperymentu, np. prędkość resztkową pocisku po przebicciu płyty, waga wybitych korków, etc. Rozważane są różne przypadki optymalizacyjne ważne dla zleceniodawcy zagadnienia – nie są to jednak problemy aż tak ważne dla nauki. Co więcej, w samych porównaniach eksperymentu z numeryką mało jest już nauki a mamy jej sprawdzenie przed zastosowaniami utylitarnymi.

Stąd, wyniki numeryczne same w sobie są wartościowe i mogą posłużyć do sprawdzenia rzeczywistego projektu powłoki ochronnej. Tyle, że w rzeczywistości nie będziemy już mieli „idealnego zamocowania płytki na brzegach”, a wystąpią gorsze i bardziej niebezpieczne przypadki praktyczne.

Druga z serii prac autorów Frąś-Roth-Mohr jest taka sama co do struktury, rozpatrywany jest przypadek z płytką o innej grubości i pociskami o innych kształtach. Mimo podobieństwa prac mamy tu oryginalny wkład do nauki jakim są wykresy stress triaxiality i parametru Lodogo (stress shearness), pokazujący lokalne wartości tych parametrów na krótko przed przebicciem się pocisku (rys. 11, str. 266). Tylko wartości parametru Lodogo około 0 pozwalają używać jednoparametrowego kryterium zniszczenia i naprężenia ekwiwalentnego typu HMH, w pozostałych przypadkach muszą decydować bardziej „wyrafinowane modele wytężenia”. Szkoda, że brak jest fizycznych interpretacji tych parametrów, czytelnik sam mógłby się ich domyślać, gdyby dla porównania podane w tych samych miejscach wykresy innych niezmienników lub składowych naprężeń.

Cenne i świadczące o oryginalności wyników są też wykresy obu diskutowanych niezmienników w jednym, wybranym, punkcie w funkcji czasu wyrażonej poprzez narastające ekwiwalentne odkształcenie plastyczne (fig 12, str. 267). Nowością są również wykresy temperatury metalu zmieniającej się w trakcie przebijania – numeryczne nagrzanie metalu sięga nawet do 700 stopni.

Szkoda, że w tym przypadku temperatura pocisku nie jest jedną z mierzonych wielkości eksperymentalnych. Na marginesie - wszyscy pamiętamy drugi odcinek filmu „Czterej Pancerni i Pies”, kiedy to Janek, aby udowodnić celność swoich strzałów wybiera z piasku strzelnicy trzy ciepłe pociski. Oczywiście, zmierzenie temperatury powierzchni pocisku

oddaloby już pomniejszoną temperaturę chwili pęknięcia i przebijania, konieczny byłby tu więc model nie-fourierowskiego transportu ciepła.

Wnioski tej pracy koncentrują się na podkreśleniu znaczenia kształtu ostrza – dotychczas wiadomo było jakie kształty są najlepsze, ale była to wiedza praktyczna (np. ścięcie czubka dla lepszego rozerwania ciała) bez ilościowego uzasadnienia opartego na analizie modelowej. Stąd rysunek wynikowy (nr 14, str. 270) omawiający zmianę prędkości pocisku i energię podczas przebijania, jest praktyczną, oryginalną daną dla producentów uzbrojenia, przypuszczam że jedną z pierwszych.

Trzecia praca autorów Frąś-Roth-Mohr oparta jest na tych samych danych eksperymentalnych (grubość płytki 3 mm i trzy rodzaje ostrzy) a różnica – podkreślona w tytule pracy – dotyczy nie modelu lepkoplastyczności lecz modelu pęknięcia. Autorzy w tym przypadku zdecydowali się, oprócz modelu pęknięcia Hosforda-Coulomba, użytego przez nich wcześniej, opracować, użyć i porównać model pęknięcia Johnsona-Cooka. Ten ostatni model krytycznego odkształcenia plastycznego jest pięcioparametrowy (D_i , $i = 1,2,3,4,5$). Autorka lakonicznie stwierdza, iż te stałe zostały skalibrowane (gdzieś ?) i podaje tabelę ich wartości (tab 1 str. 7). Szkoda, bo sam proces skalibrowania jest wartościowy i mógłby stanowić osobną pracę doktorską. Osiągnięciem jest też napisanie nowego UMAT-u do kodu komercyjnego. Wiem co mówię, bowiem znam osoby które dodawały własne modele do kodów komercyjnych i nie było to łatwe zadanie i krótkie (ok. 3-4 lat).

Autorzy słusznie zawężili prezentację wyników tylko do porównania mody pęknięcia (w czasie) dla modelu **Hosforda-Coulomba** i modelu **Johnsona-Cooka**. Byłoby nieszczęściem dla teorii pęknięcia, gdyby rezultaty okazały się być jednakowe. Stąd słusznie autorzy nie porównują integralnych parametrów typu prędkość resztkowa, masa resztkowa, lecz poszukują subtelnych parametrów takich jak wykres „stress triaxiality – ekwiwalentne odkształcenie plastyczne” (rys 10, str 8) – w obu modelach wielkość „stress triaxiality” występuje ale jak wskazuje rys 10 jest on chyba inaczej definiowany - co prowadzi do absurdalnie dużych różnic. Natomiast, parametr Lodego w modelu zniszczenia Johnsona-Cooka nie występuje (choć można go wyliczyć z naprężeń głównych) - stąd wykres „parametr Lodego - ekwiwalentne odkształcenie plastyczne” autorzy pokazują tylko dla modelu zniszczenia Hosforda-Coulomba.

Osobiście nie przekonuje mnie wniosek pracy mówiący, iż model zniszczenia Hosforda-Coulomba jest pewniejszy niż model Johnsona-Cooka który „presents a more ambiguous material response”. Nie jestem przekonany do tego wniosku ponieważ oparty jest on na ukrytych przed czytelnikiem wynikach i brak jest *explicite* w pracy twardego dowodu na takie deprecjonowanie modelu Johnsona-Cooka. Twardym dowodem byłby na przykład wspomniany rys 10 na którym pokazano by nie dwie a trzy krzywe - dwie z modelu a jedną z eksperymentu. Model, który byłby bliższy eksperymentowi uznałbym za lepszy.

8. Komentarz trzeci

W rozdziale 3, tu cytowanej pracy, Autorka, prawdopodobnie niezadowolona z użytego przez siebie modelu dyskretyzującego układ równań opisujących, dość niespodziewanie porzuca dotychczasowy sposób dyskretyzacji metodą elementów skończonych i pragnie zająć się metodami bezsiatkowymi typu SPH. Nic bardziej mylnego niż używanie techniki

dyskredytacyjnej SPH, która traci wiele z modelu kontynualnego i nie potrafi wykorzystać wszystkich wykalibrowanych stałych. Osobiście odradzam używanie tak wulgarnej techniki, która całą plastyczność i zniszczenie opisuje dwoma parametrami branyymi znikąd.

Z pewnym niepokojem patrzę na problemy obliczeniowe, o których się tu mówi. W Zakładzie Konwersji Energi, mamy własne przykre doświadczenie z elementem 8-węzłowym dlatego jest on u nas zakazany zarówno w obrębie CFD, CSD jak i FSI. Ale Inni naiwni go stosują myśląc że zagęszczanie siatki do 20-30 milionów elementów wprowadza jakąś: „okultystyczną stałą fizyczną”. Jest to współczesny zabobon mechaniki komputerowej, który należy zwalczać.

Sugeruję Kandydatce sięgnąć po inne elementy skończone lub objętości skończone a dolegliwości ustaną w mig.

9. Praca w zespole: Frąś – Murzyn – Pawłowski

W tej pracy autorzy odchodzą od wykalibrowanego materiału Mars@300 dla którego model Hosforda-Coulomba jest „pewniejszy” niż model Johnsona-Cooka i podejmują bardziej rzeczywiste badania płyt typu „add-on” wykonanych ze stali bainitycznej przebijanej pociskami typu Wimchester Magnum, zbudowanych z takich materiałów jak mosiężny płaszcz, rdzeń ze stali wysokowytrzymałej i ołowianej końcówki. Mamy więc, nie jeden jak poprzednia a cztery materiały do kalibracji - stąd autorzy, chcąc nie chcąc, rezygnują z modelu który sami uważaną za lepszy i sięgają po gotowy model zniszczenia Johnsona-Cooka ze stałymi wykalibrowanymi przez innych badaczy (tab. 3, str. 247).

Praca ma charakter świetnie przygotowanego raportu technicznego z badań obiektów rzeczywistych. Część eksperymentalna jest imponująca, oddano 30 strzałów o prędkości 820 m/s . Badano zachowanie się pocisku w zależności gdzie pocisk uderzył – w perforację czy w okolicę perforacji. Część obliczeniowo-symulacyjna wniosła informacje o lokalnym przebiegu deformacji i zniszczenia dając konstruktorom więcej wskazówek. Cel badań był stricte praktyczny; było to ustalenie klasy odporności zleconego obiektu według stosownej normy. Ta praca mogłaby być usunięta z cyklu habilitacyjnego gdyż stanowi cenny dorobek.

10. Praca w zespole Frąś – Pawłowski – Li – Wierzbicki.

Praca podejmuje problem zamodelowania przestrzelenia baterii litowo-jonowej pociskiem ołowianym małokalibrowym Parabellum. Wykonano serię pomiarów przestrzelenia baterii dającej stosunkowo niewielki opór pociskom tego kalibru bowiem spadek prędkości początkowej w próbie przebicie dwóch baterii nie przekraczał 8 %. Wydaje się że stanowisko badawcze było wyjątkowo dobrze wyposażone.

Część modelowa wymagała zbadania poszczególnych materiałów katody i anody oraz elektrolitu i obudowy (grafit, tlenek litu). Oparto się tu o wyniki badań materiałowych innych autorów (np. rys 2 str. 4)

Niezwykle trudna była dyskretyzacja wszystkich warstw baterii. Niektóre warstwy były z przyczyn obliczeniowych symulowane jako elementy dwuwymiarowe. Może to było dopuszczalne, chociaż osobiście zabraniam tego typu kombinacji, za dobrze znam skalę uproszczeń jakie niesie w sobie element typu shell. Autorzy zdecydowali się z mieszaniem różnych naprężeń ekwiwalentnych i ekwiwalentnego odkształcenia plastycznego w modelach wyężenia typu HMH, Drucker-Prager/Cap, czy Dashponde-Flecka. Może takie podejście jest

pragmatyczne ale czy fizycznie sensowne? Jednak ta część pracy jest wyjątkowo wymagająca, wymagająca zarówno talentu numerycznego jak i doświadczenia w opisie zniszczenia różnych materiałów. Wpływ narzędzi i modeli prof. Wierzbickiego jest tu widoczny. Przedstawienie deformacji i zniszczenia w różnych momentach przebijania jest wyjątkowej urody i świadczy o dużym rozpoznaniu i opanowaniu narzędzi badawczych.

11. Praca w zespole Frąś – Colard – Lach – Rusinek - Reck

W pracy tej autorzy zmieniają skalę problemu na zdecydowanie większą i zajmują się dużymi pociskami odłamkowymi uderzającymi w płyty aluminiowe pojazdów opancerzonych. Chodzi o wyznaczenie odporności balistycznej samochodów opancerzonych. Eksperyment jest więc w tym przypadku trudny a mimo to udało się wyznaczyć „graniczną krzywą balistyczną” (fig 5. str. 339) pokazującą że moda zniszczenia zmienia się wraz z prędkością wystrzału; raz poprzez wybicie korka (plugging) a raz poprzez horyzontalne wypchnięcie (discing).

Ta praca prezentuje ważny etap, jakim jest analiza mikroskopowa z użyciem mikroskopu optycznego. Chodziło w nim o ustalenie dominującego obrazu zniszczenia na poziomie mikroskopowym. Odkryto „rozwarstwienia” między warstwami aluminium lub, w drugim przypadku, zlokalizowane pasma ścinania. Autorzy kładą tezę, że pasma ścinania zależą od takich własności jak miękniecie termiczne i niskie współczynniki utwardzania. Zakłada się, że energia cieplna generowana w ścinaniu prowadzi do wytworzenia się „pasm ścinania adiabatycznego”. Natomiast „discing” występujący przy dużych prędkościach uderzenia bierze się z efektów balistycznych i podłużnych fal naprężenia. Dyskusja nad zjawiskami przeprowadzona przez autorów - jest oryginalna i pionierska w literaturze. Wydaje się na rys. 17 przedstawiono taką szczególną prędkość gdzie następuje zmiana mody plugging na discing – jest to niezwykle poglądowy rysunek.

Bardzo skomplikowany jest zastaw badań materiałowych dotyczący stopu aluminium – zbadano tu też wpływ temperatury i prędkości deformacji zarówno dla rozciągania jak i prostego ścinania. Te badania posłużyły do skalibrowania modelu zniszczenia Johnsona-Cooka do którego wprowadzono zwykły parametr zniszczenia Kachanowa, ewoluujący pod wpływem prędkości odkształcenia. Te wszystkie parametry autorzy wprowadzają do modelu, zastrzegając się jednak, że trzeci niezmiennik tensora dewiatora winien być wykorzystany w kompletnej i bardziej dokładnej analizie – ciekawe skąd o tym wiedzą i skąd takie przekonanie (str. 345) ? Bowiem na rysunkach 22 i 23 przedstawiono tylko analizę stress triaxiality.

12. Praca w zespole Frąś – Colard – Pawłowski

W części eksperymentalnej i w jednej połowie numerycznej praca jest oparta na wynikach pomiarów i obliczeń wykonanych poprzednio w zespole Frąś – Colard – Lach – Rusinek - Reck. Różnica polega na pomyśle wprowadzenia, oprócz MES, nowego typu narzędzia obliczeniowego nazywanego SPH. Autorzy podkreślają iż największe różnice w obu rodzaju dyskretyzacjach leżą po stronie warunków kontaktu obu stykających się ciał.

Osobiście nie jestem przekonany, że obie dyskretyzacje MES i SPH w punkcie wyjściowym mają ten sam układ równań opisujących. W literaturze, zwłaszcza dotyczącej płynów, MES, MOS mają te same równania wyjściowe ale nie SPH. Toteż, tak duże różnice między MES a SPH na niekorzyść SPH, nie tylko mogą się brać z różnic w dyskretyzacji lecz również z różnic w sformułowaniu równań opisujących.

Autorzy pokazują, iż nie tylko pola lokalne otrzymane metodą SPH mają błędne wartości ale i wartości integralne typu wymiary korka, masa pocisku czy prędkości resztkowe pocisku. Wniosek – SPH nie nadaje się do tego typu zagadnień.

13. Rozdział w monografii autorstwa T. Frąś

Autorka wykazuje się tutaj talentem w syntetycznym ujęciu wyników poprzednich prac, ich poglądowym przedstawieniu na ogólnych rysunkach, bogatym opisie słownym wyników, zestawieniu w tabelach, etc. Autorka, wykonała też, głębiej niż w dotychczasowych artykułach, analizy dokonań innych autorów w swojej dziedzinie i przedstawiła szkic tego co można nazwać „stanem wiedzy”.

14. Praca „Experimental and numerical study...” autorstwa T. Frąś

Autorka zajęła się najtrudniejszym przypadkiem jakim jest modelowanie pocisków przeciwpancernych przeznaczonych do penetracji pancerzy pojazdów opancerzonych typu czołg. Zarówno pocisk jak i pancerz składa się z wielu części. Pocisk ma rdzeń podkalibrowy i sabot a pancerz ma warstwę gumy pomiędzy płytami stalowymi. Guma wywołuje efekt wybrzuszenia (bulging), co przyczynia się do fragmentaryzacji pocisków. Widać dbałość autorki o jak najdokładniejsze opisanie konstrukcji pocisku i pancerza i to zarówno w eksperymencie jak i numerycznych symulacjach. Badania są tu bardzo kosztowne. Zadziwia wielkość stanowiska, użycie prawdziwego działa, nachylenie pancerza pod kątem 60 stopni, etc. Każdy strzał był tu rejestrowany za pomocą sekwencyjnego aparatu rentgenowskiego, pozwalającego wyodrębnić fragmenty pocisków na podstawie filmu.

Testy wykazały, że na wolframowe rdzenie pocisków nie ma mocnych, przebijają wszystko, hamując prędkość jedynie o 5 %. Toteż nie redukcję prędkości ale fragmentaryzację pocisku trzeba uznać za główny efekt takiego trójskładnikowego pancerza. Te efekty zostały potwierdzone w symulacjach numerycznych, które wykazały wybrzuszenia początkowo równoległych płyt. Symulacja numeryczna pozwoliła Autorce na odkrycie przyczyny fragmentaryzacji rdzeni pocisków.

Autorka użyła wykalibrowanych przez siebie narzędzi numerycznych, dodatkowo też wykonała pomiaru charakterystyk materiałowych stopu wolframu na mini próbkach o średnicy 2 mm. Niewątpliwie ta praca jest najbardziej skomplikowana, złożona i najtrudniejszą w całym cyklu. Słusznie też jest koroną wszystkich wysiłków Autorki i może być uznana za najcenniejszą. W klasycznej procedurze habilitacyjnej, ta tylko praca mogłaby być podstawą habilitacji.

15. Ocena wkładu Kandydatki do nauki.

Opierając się na przedstawionej powyżej opinii uważam, że rozprawa habilitacyjna Kandydatki stoi na najwyższym naukowym poziomie. Znaczny wkład do nauki polega na tym, że Kandydatka przedstawiła szereg oryginalnych pomysłów, rozwijających w sposób twórczy naukę o wyteżeniu materiału poddanego uderzeniom (pancerza przebijanego pociskiem). Niezwykłą wartość wyników dla nauki podkreśla fakt jednoczesnego wykonywania przez Kandydatkę badań eksperymentalnych i numerycznych – o najwyższej skali trudności. Uważam, że praca Kandydatki jest pionierskim, cennym i trwałym wkładem do nauki i jest z pewnością w pełni oryginalnym osiągnięciem spełniającym z nadmiarem wymagania stawiane rozprawom habilitacyjnym. Jej rozprawa jest wyróżniająca się. Dzięki rozwinięciu narzędzi eksperymentalnych i numerycznych, w nowym, trudnym temacie dotarła do nowej wiedzy

mającej znaczenie teoretyczne jak i użyteczne. Kandydatka jest już, można powiedzieć, wybitnym mechanikiem, specjalizującym się w mechanice zniszczenia uderzeniowego, znanym i cenionym w swoim międzynarodowym środowisku.

16. Ocena dorobku badawczo-naukowego.

Kandydatka od lat współpracuje z kilkoma czołowymi ośrodkami przemysłowo-militarnymi. Bez ich finansowego wsparcia, których nie można by było wykonywać tak kosztownych eksperymentów. Toteż użyteczne cele są tłem jej wysiłków naukowych, a pozostały dorobek naukowy, często pokazuje szczegóły badań nad rozwojem opancerzenia. Dodatkowy dorobek Kandydatki, składający się z około 20 publikacji, jest wyróżniający zarówno pod względem uszczegółowienia problematyki jak i chęci syntetycznego ujęcia całości zjawisk balistyki końcowej. Dr Teresa Frąs rozumie, że pracuje w interdyscyplinarnej dziedzinie wiedzy o dużym potencjale rozwojowym, która jest „siłą napędową” dla poszukiwań nowych materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych, tym samym stwarzając nowe coraz trudniejsze i bardziej złożone wyzwania naukowe.

Wzorcowe jest również jej tempo prac, wynikające z zespołowego podejścia do problemu. Kandydatkę charakteryzuje umiejętność pracy zespołowej, a co za tym idzie wymiany wiedzy i informacji w zespole jej współpracowników. Przyszłość, że przedstawiona ilość współautorów i ich ranga jest tu imponująca.

Ważnym podkreślenia jest także fakt, iż Kandydatka, poprzez swoje liczne wystąpienia na konferencjach specjalistycznych jest znana w środowisku naukowym. Ich ilość świadczy o aktywności zawodowej, wadze wyników, ciągle żywym zainteresowaniu rozwojem i postępami mechaniki uderzenia.

17. Udokumentowana współpraca.

Kandydatka współpracuje z badaczami z Politechniki Federalnej w Zurychu (ETHZ), z Instytutem Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie, z Massachusetts Institute of Technology (MIT), z Uniwersytetu Lotaryńskiego w Metz, z Nagoya Institute of Technology i innymi. Lista prac dorobku jest znakomita, sama Kandydatka zwraca uwagę w szczególności na prace podoktorskie J. Karla i M. Stańczak, w których oprócz wkładu naukowego sprawowała również opiekę naukową nad przygotowaniem doktoratu.

Co istotne także, Kandydatka zna z autopsji europejskie ośrodki naukowe, jak również Stany Zjednoczone gdyż odbyła staż MIT Cambridge. Jest to nie bez znaczenia przy jej przyszłościowym kandydowaniu do tytułu i stanowiska profesora.

18. Dorobek dydaktyczny.

Dr Frąs od 2018 roku jest zatrudniona na Uniwersytecie Strasburskim. Prowadzi tam wykłady z *Experimental Mechanics* dla studentów kursu magisterskiego.

19. Dorobek organizacyjny

Jak wynika z dokumentacji, pani dr Teresa Frąs może pochwalić się także umiejętnościami organizacyjnymi, polegającymi na dobrej współpracy z ośrodkami militarnymi, placówkami naukowymi, jak i zarówno z podwykonawcami części i producentami sprzętu pomiarowego. Jest to więc dorobek oryginalny i sam w sobie niezwykle, nie tak częsty w naszym, krajowym

środowisku. Na koniec, wartym wspomnienia jest fakt, kierowania przez nią dwoma grantami badawczymi.

20. Wniosek końcowy

Podsumowując, jestem przekonany, że rozprawa habilitacyjna Pani Teresy Frąś spełnia z nadmiarem ustawowe warunki stawiane rozprawom habilitacyjnym. Stanowi własny, oryginalny wkład w rozwój nauki mechaniki uderzenia (balistyki końcowej) i winna być dopuszczona do dalszych etapów przewodu habilitacyjnego.

Jej znaczny wkład w rozwój nauki, polega na ilościowym i jakościowym poznaniu i zrozumieniu balistyki i mechaniki przebijania, uzyskany poprzez spójne opracowanie narzędzi eksperymentalnych i numerycznych.

Poprzez swój udział w konferencjach naukowych oraz znaczący dorobek publikacyjny jest znaną i cenioną w środowisku osób zajmujących się zawodowo mechaniką pękania. Jej udział w praktycznych zadaniach, ważnych dla obronności jest bezcenny, a w naszych krajowych warunkach jest wyróżniający. W swej pracy habilitacyjnej dr Frąś wykazała się olbrzymią wiedzą, wyniesioną z europejskich i polskich ośrodków badawczych. Jej talent naukowy, wytrwałość i zaangażowanie twórcze są godne podziwu.

Dlatego też, zwracam się do Rady Doskonałości Naukowej oraz Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki z prośbą, o nadanie Pani dr Teresie Frąś. stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie naukowej - Inżynieria Mechaniczna.

Janusz Kader