

Prof. dr hab. inż. Mieczysław Kuczma
Zakład Konstrukcji Budowlanych
Instytut Budownictwa
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu
Politechnika Poznańska
E-mail: mieczyslaw.kuczma@put.poznan.pl

Poznań, 17.01.2025

Recenzja

**osiągnięcia naukowego w postaci cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych
pt. „Wieloskalowe modelowanie konstytutywne wpływu promieniowania
na właściwości mechaniczne materiałów sprężysto-plastycznych”
oraz dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego
dr inż. Anety USTRZYCKIEJ
w postępowaniu habilitacyjnym**

Podstawa opracowania recenzji

1. Pismo Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie, prof. dr hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego, informującego o powierzeniu mi roli recenzenta w postępowaniu habilitacyjnym dr inż. Anety Justyny Ustrzyckiej.
2. Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r.: Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 1669 z dnia 30 sierpnia 2018 r.).
3. Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r.: Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 478 z dnia 16 marca 2021 r.).
4. Nadesłany wniosek i dokumentacja dorobku dr inż. Anety Ustrzyckiej w formie papierowej i elektronicznej (na pendrive), o której mowa w art. 220 ust. 2 Ustawy, zawierające: Wniosek, Dane wnioskodawcy, Wykaz osiągnięć naukowych, Dyplom uzyskania stopnia doktora, Wykaz osiągnięć naukowych, Oświadczenia współautorów oraz Kopie 5 prac stanowiących osiągnięcie naukowe. Dokumenty (oprócz Oświadczenia współautorów i Dyplomu doktorskiego) zostały przedłożone w j. polskim i j. angielskim.

1. Informacje ogólne o Habilitantce

Aneta Ustrzycka jest absolwentką Uniwersytetu Warszawskiego w Warszawie, gdzie odbyła studia dzienne na Wydziale Fizyki i uzyskała tytuł zawodowy magistra fizyki (2005r.). Promotorem pracy magisterskiej pt. „*Próba interpretacji chmur rodzaju Stratus na sodarogramie*” był prof. dr hab. Krzysztof Haman. W latach 2009 - 2012 była słuchaczką studiów doktoranckich Politechniki Krakowskiej. Rozprawę doktorską pt. „*Optymalne kształtowanie elementów konstrukcyjnych z uwagi na czas zniszczenia mieszanego w warunkach pelzania*” obroniła z wyróżnieniem i uzyskała stopień naukowy doktora nauk technicznych nadany uchwałą Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej w

dniu 19 grudnia 2012 r. Promotorem rozprawy doktorskiej był prof. dr hab. inż. Krzysztof Szuwalski, a recenzentami prof. dr hab. inż. Tadeusz Burczyński i prof. dr hab. inż. Bogdan Bochenek.

W latach 2002-2006 była asystentką w Zakładzie Teledetekcji Atmosfery Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Krakowie. Po obronie doktoratu, w latach 2012-2016, dr inż. Aneta Ustrzycka była zatrudniona na stanowisku adiunkta w Instytucie Mechaniki Stosowanej Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej. Od roku 2016 jest zatrudniona na stanowisku adiunkta w Zakładzie Mechaniki Doświadczalnej IPPT PAN w Warszawie.

Przedmiotem badań naukowych Habilitantki jest zachowanie się materiałów krystalicznych, metali konstrukcyjnych poddanych napromieniowaniu wiązką wysokoenergetycznych cząstek. Jej prace badawcze obejmują eksperymenty doświadczalne, modelowanie i symulacje komputerowe wpływu napromieniowania na zmianę właściwości mechanicznych takich materiałów. Są to więc badania dotyczące zjawisk na pograniczu fizyki i mechaniki materiałów, o dużym stopniu złożoności, a z drugiej strony wychodzące naprzeciw potrzebom zaawansowanych technologii w przemyśle elektronicznym, kosmicznym i jądrowym.

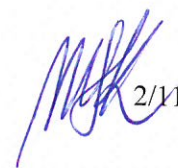
2. Charakterystyka i ocena osiągnięcia naukowego

W postępowaniu habilitacyjnym Kandydatka przedkłada do oceny osiągnięcie naukowe w postaci cyklu pięciu powiązanych tematycznie artykułów naukowych, które ukazały się w latach 2016-2022, pod tytułem:

Wieloskalowe modelowanie konstytutywne wpływu promieniowania na właściwości mechaniczne materiałów sprężysto-plastycznych

Wskazany przez Habilitantkę cykl obejmuje następujące artykuły:

- A1. Skoczeń B., **Ustrzycka A. (2016)** Kinetics of evolution of radiation induced micro-damage in ductile materials subjected to time-dependent stresses. *International Journal of Plasticity*, DOI: 10.1016/j.ijplas.2016.01.006, Vol.80, pp.86-110, **2016**. IF=6.490, MNiSW: 45, Liczba cytowań wg: Scopus – 8(9), Web of Science – 8 (udział **50%**).
- A2. **Ustrzycka A.**, Mróz Z., Kowalewski Z.L., Kucharski S. **(2020)** Analysis of fatigue crack initiation in cyclic microplasticity regime. *International Journal of Fatigue*, DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105342, Vol.131, pp.105342-1-15. IF=4.369, MNiSW: 140, Liczba cytowań wg: Scopus – 8(10), Web of Science – 7 (udział **50%**).
- A3. **Ustrzycka A.**, Skoczeń B., Nowak M., Kurpaska Ł., Wyszowska E., Jagielski J. **(2020)** Elastic-plastic-damage model of nano-indentation of the ion-irradiated 6061 aluminium alloy. *International Journal of Damage Mechanics*, doi.org/10.1177/1056789520906209, Vol.29, pp.1-35. IF=3.125, MNiSW: 100, Liczba cytowań wg: Scopus – 4(5), Web of Science – 4 (udział **60%**).
- A4. **Ustrzycka A. (2021)** Physical mechanisms based constitutive model of creep in irradiated and unirradiated metals at cryogenic temperatures. *Journal of Nuclear Materials*, DOI: 10.1016/j.jnucmat.2021.152851, Vol.548, pp.152851-1-15, IF=2.936, MNiSW: 100, Liczba cytowań wg: Scopus – 1(2), Web of Science – 1 (udział 100%).



2/11

A5. Nowak M., Mulewska K., Azarov A., Kurpaska Ł., **Ustrzycka A. (2022)** A peridynamic elasto-plastic damage model for ion-irradiated materials. *International Journal of Mechanical Sciences*, doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107806, Vol.22, pp. 00686-5, IF= 6.772, MNiSW: 140, Liczba cytowań wg: Scopus – 0(16), Web of Science – 0 (udział **45%**).

W autoreferacie Habilitantka odwołuje się też do pracy [Ustrzycka, et al. 2023 (praca w recenzji)], której jest pierwszym autorem, a która została opublikowana 6 września 2024 roku:

D1. **Ustrzycka A.**, Dominguez-Gutierrez F.J., Chromiński W. (2024) Atomistic analysis of the mechanisms underlying irradiation-hardening in Fe–Ni–Cr alloys. *International Journal of Plasticity*, <https://doi.org/10.1016/j.ijsplas.2024.104118>, 182 (2024) 104118

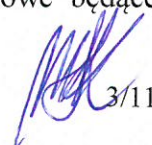
Jak pokazuje powyższe zestawienie, wszystkie artykuły cyklu zostały opublikowane w renomowanych czasopismach światowych: *International Journal of Plasticity*, *International Journal of Fatigue*, *International Journal of Damage Mechanics*, *Journal of Nuclear Materials*, oraz *International Journal of Mechanical Sciences*. Habilitantka jest pierwszą autorką trzech artykułów, w tym jednej publikacji jest samodzielną autorką, oraz współautorką dwóch pozostałych prac. Habilitantka była autorką korespondencyjną wszystkich artykułów [A1-A5]. We wniosku podano zakres merytoryczny i udział procentowy wkładu Habilitantki w powstanie poszczególnych artykułów, poparte załączonymi oświadczeniami współautorów. Jak wynika z danych podanych w autoreferacie, udział Habilitantki w powstanie pracy jest dominujący i wynosi kolejno wg powyższej listy: w [A1] — 50%, [A2] — 50%, [A3] — 60%, [A4] — 100%, [A5] — 45%. Warto tu także podkreślić, że współautorami publikacji są m.in. prof. Błażej Skoczeń oraz prof. Zenon Mróz i prof. Zbigniew Kowalewski, badacze cieszący się niezwykle dużym autorytetem w środowisku naukowym w kraju i za granicą.

Według zamieszczonych we wniosku deklaracji widać, że zakres i wkład merytoryczny Habilitantki we wszystkich pracach współautorskich dotyczył istotnych elementów przeprowadzonych badań, był wiodący i obejmował współautorstwo koncepcji pracy [A1, A2, A3, A5], modeli konstytutywnych [A2] oraz metodyki badań eksperymentalnych i opracowania ich wyników [A2, A3, A5]. Habilitantka przeprowadziła samodzielnie badania doświadczalne [2], obliczenia numeryczne [A1, A2, A3, A4], analizy otrzymanych wyników [A1, A4] oraz opracowała modele konstytutywne [A1, A3, A4,]. Miała znaczący udział w przygotowaniu każdego manuskryptu.

Ocena merytoryczna cyklu pięciu powiązanych tematycznie artykułów naukowych

Tematyka badawcza doktoratu Habilitantki dotyczyła matematycznego i numerycznego modelowania elementów konstrukcyjnych celem wyznaczenia ich optymalnego kształtu z uwagi na czas zniszczenia mieszanego w warunkach pełzania.

Można zauważyć, że uzyskane w badaniach do doktoratu doświadczenie poznawcze Habilitantki stanowiło dobrą podstawę do jej badań w dziedzinie wpływu promieniowania wiązką wysokoenergetycznych cząstek na właściwości mechaniczne materiałów sprężysto-plastycznych, których wyniki Habilitantka przedstawia jako osiągnięcie naukowe będące



3/11

podstawą niniejszego wniosku habilitacyjnego. Oddziaływanie między wysokoenergetycznymi cząstkami a atomami sieci prowadzi do powstania defektów punktowych (wakancje i atomy międzywęzłowe) oraz klastrow pustek i klastrow atomów międzywęzłowych, bąbli helowych, czy pętli dyslokacyjnych. Napromieniowane materiały stają się wysoce porowate. Promieniowanie powoduje modyfikację właściwości mechanicznych i fizycznych materiału krystalicznego, m.in. podwyższenie jego granicy wytrzymałości, ale obniżenie ciągliwości i kruchość, zwiększenie objętości.

W pracy [A1] rozpatrzono zagadnienie ewolucji uszkodzeń radiacyjnych w ciałach stałych, które narażone są na jednoczesne działanie promieniowania oraz obciążenia mechanicznego wywołującego naprężenia powyżej granicy plastyczności materiału. Ewolucje uszkodzeń wywołanych promieniowaniem i indukowanych mechanicznie Autorzy ujęli addytywną formułą w odniesieniu do (szybkości zmian) anizotropowych tensorów uszkodzeń w ramach koncepcji Kontynualnej Mechaniki Uszkodzeń (CDM). Autorzy zaproponowali wieloskalowy model konstytutywny bazujący na fizycznym opisie mechanizmu powstawania klastrow pustek w napromieniowanych ciałach stałych. Opracowany i zaimplementowany model bazuje na eksperymentalnym oszacowaniu koncentracji defektów sieci w aluminium Al jako funkcji parametru dpa (displacement per atom – przemieszczenie na atom). Do opisu kinetyki ewolucji uszkodzeń wywołanych promieniowaniem w warunkach naprężeń wywołanych mechanicznym obciążeniem zastosowano dwa kinetyczne prawa ewolucji uszkodzeń wg modelu Rice'a i Traceya oraz model Gursona (rozwoju porowatości). Dodać należy, że choć natura mikrouszkodzeń indukowanych mechanicznie, a obejmujących mikropustki i mikropęknięcia, różni się od natury wzbudzania mikrouszkodzeń, które spowodowane są działaniem promieniowania i składających się z klastrow mikropustek powstałych w wyniku oddziaływań sprężystych cząstek z atomami sieci, to zastosowana ich tensorowa miara bazuje na geometrycznej definicji i pozwala ująć ich wielkość w sposób jednolity. Efekty plastyczne zostały opisane w terminach zmiennych efektywnych uwzględniając wzmocnienie kinematyczne i izotropowe, stowarzyszone prawo plastycznego płynięcia oraz kinetyczne prawo ewolucji mikrouszkodzeń indukowanych mechanicznie w uogólnionej postaci. W proponowanym modelu, uszkodzenia wywołane promieniowaniem w postaci skupiska (klastra) sferycznych pustek, odzwierciedlających jego izotropową naturę, ewoluują w funkcji naprężenia generowanego przez quasi-statyczne lub cykliczne obciążenia mechaniczne. Rozpatrzono cykliczny mechanizm degradacji sieci wskutek cyklicznego napromieniowania w warunkach cyklicznych obciążeń mechanicznych, przy czym uwzględniono mechanizm zarodkowania i ewolucji skupisk pustek polegający na wytwarzaniu nowych klastrow, a także na wzroście klastrow powstałych w trakcie poprzednich cykli. Na podstawie ogólnych rozważań przypadku modelu 3D, Habilitantka wyprowadziła analityczne zamknięte rozwiązanie dla jednoosiowego stanu naprężenia i zaimplementowała je do analizy cienkościennej powłoki cylindrycznej wykonanej z aluminium (wg modelu materiału Ramberga-Osgooda), poddanej promieniowaniu cyklicznemu i wydłużeniu osiowemu. Żywotność napromieniowanego elementu została wyrażona w funkcji dwóch parametrów: maksymalnego dpa i amplitudy naprężeń osiowych w cyklu. Opracowany model i otrzymane oryginalne rozwiązanie analityczne umożliwia oszacowanie czasu do powstania awarii (widocznego uszkodzenia – rysy) elementu

konstrukcyjnego wywołanej działaniem promieniowania w warunkach obciążenia mechanicznego, przy wykorzystaniu Kontynualnej Mechaniki Uszkodzeń (w przykładzie obliczeniowym przyjęto wartość parametru uszkodzenia $D = 0,1$ jako odpowiadającą powstaniu rysy). Ważną składową modelu jest funkcja rozkładu dpa , którą Habilitantka zaproponowała w postaci oryginalnego wyrażenia analitycznego w bezpośredniej bliskości powłoki cylindrycznej (współosiowej tarczy osadzonej w detektorze cząstek). Model Rice'a i Traceya lepiej odzwierciedla fizyczny mechanizm rozwoju uszkodzeń wskutek napromieniowania, któremu towarzyszy wzmocnienie mieszane kinematyczne/izotropowe wzmocnienie materiału, niż model Gursona, w którym powierzchnia plastyczności kurczy się wraz ze wzrostem porowatości. Habilitantka wykazała, że liczba cykli do awarii zależy w dużym stopniu od akumulacji mikrouszkodzeń spowodowanych napromieniowaniem. Przedstawione ujęcie analizowanego problemu, choć oparte na kilku znanych elementach, jest oryginalne i zawiera w/w nowe oryginalne elementy.

W pracy [A2] Habilitantka poddaje analizie mechanizmy inicjacji uszkodzeń indukowanych mechanicznie w materiałach polikrystalicznych poddanych cyklicznym obciążeniom w zakresie mikroplastycznych deformacji, rozumianych jako zjawisko lokalne, charakteryzujące się plastycznym płynięciem w małych zlokalizowanych domenach. Badanie obszarów mikroplastyczności umożliwia zrozumienie mechanizmów fizycznych związanych z inicjacją oraz ewolucją defektów generowanych w materiałach sprężysto-plastycznych, tutaj rozpatrywane w aspekcie zarodkowania pęknięć zmęczeniowych. Zjawisko mikroplastyczności może ograniczyć się do niewielkiej liczby ziaren lub wtrąceń w materiale i przebiegać przy stosunkowo niskim średnim poziomie naprężeń (znacznie poniżej granicy plastyczności materiału) ze względu na lokalną koncentrację odkształceń na ich granicach. Amplituda naprężeń musi jednak osiągnąć wartość progową, powyżej której tworzą się strefy mikroplastyczne i inicjują mikroskopijne pęknięcia.

Habilitantka wspólnie z współautorami pracy [A2] zaproponowała nowe podejście do modelowania konstytutywnego mechanizmu inicjacji uszkodzeń, bazujące na koncepcji lokalnych fluktuacji naprężeń w ujęciu mechaniki kontinuum. W opisie matematycznym narastania uszkodzeń zmęczeniowych i inicjacji pęknięć zastosowano pojęcie płaszczyzny krytycznej z uwagi na uśrednione wartości naprężenia lub odkształcenia zarówno w przypadku monotonicznych, jak i cyklicznych obciążeń. Należy tu podkreślić, że modelowanie wzrostu uszkodzeń uzupełnione zostało badaniami eksperymentalnymi – cyklicznymi testami zmęczeniowymi (rzędu 80 000 cykli) – z wykorzystaniem optycznego systemu pomiarowego ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry). System ESPI umożliwia śledzenie procesu deformacji (składowych przemieszczenia, odkształcenia) oraz jego mechanizmów już we wczesnym etapie rozwoju uszkodzenia, aż do momentu zniszczenia, w szczególności lokalizację miejsca największej koncentracji naprężenia wywołanej niejednorodnością materiału oraz przewidzieć miejsce inicjacji uszkodzenia. Dobrym uzupełnieniem modelowania uszkodzeń były testy indentacyjne wykonane przez Habilitantkę w stanie wyjściowym i po próbie zmęczeniowej, które umożliwiły analizę efektu wzrostu uszkodzeń na podstawie lokalnych zmian modułu sztywności. Praca [2] zawiera także matematyczne modelowanie inicjacji pęknięć zmęczeniowych i porównanie wyników symulacji komputerowych z wynikami testów laboratoryjnych wykonanych na próbkach stali

P91. Otrzymane wyniki potwierdzają dobrą wzajemną zgodność oraz wskazują na dużą efektywność opracowanego modelu teoretycznego.

W pracy [A3] Habilitantka omawia charakterystykę i przedstawia wyniki badań eksperymentalnych oraz numerycznych symulacji ewolucji uszkodzeń w materiałach napromieniowanych jonami i poddanych deformacji plastycznej podczas nanowgłębiania. Napromienianie próbek jonami przeprowadziła we współpracy z Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku, poddając stop aluminium 6061 implantacji jonami helu (He) oraz argonu (Ar) w szerokim zakresie fluencji. Dokonane napromieniowanie materiału jonami 45 keV He, prowadzi do powstania pustek (bąbli, pęcherzy) i skutkuje degradacją właściwości mechanicznych, powodując kruchość i erozję powierzchni, a więc zjawiska niekorzystne dla materiałów konstrukcyjnych. Dokonane napromieniowanie jonami 160 keV Ar pozwala na uzyskanie wyższego poziomu *dpa* w materiale i skutkuje defektami w postaci pustek i pętli dyslokacyjnych. Do opisu ewolucji uszkodzeń podczas indentacji materiału sprężysto-plastycznego Habilitantka zastosowała model Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) uwzględniając porowatość radiacyjną i nową matematyczną zależność między parametrem porowatości a miarą uszkodzenia radiacyjnego (*dpa*). Model numeryczny został poddany weryfikacji w oparciu o rozpatrzone w pracy analityczne rozwiązanie Sneddona dla zagadnienia odkształcenia sprężystej półprzestrzeni przez sztywny wgłębnik o profilu stożkowym. Symulacje numeryczne, za pomocą programu Abaqus i metody elementów skończonych (MES), dały zbliżone wykresy siła-przemieszczenie do wyników pomiarów w eksperymentach laboratoryjnych i tym samym stanowią walidację modelu obliczeniowego, który zastosowała Habilitantka.

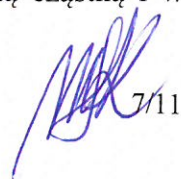
Praca [A3] dokumentuje badania doświadczalne i dalsze rozszerzenia/dostosowania modelu obliczeniowego stosowanego przez Habilitantkę. Na podkreślenie zasługują tutaj oryginalne elementy autorstwa lub współautorstwa Habilitantki:

- opracowała wraz ze Współautorami pracy metodologię napromieniowania jonowego stopu aluminium 6061 w celu wytworzenia defektów wywołanych promieniowaniem w warstwie naskórkowej materiału,
- dokonała analizy ewolucji nanouszkodzeń przy użyciu techniki instrumentalnej indentacji,
- zaproponowała nową matematyczną zależność między miarą uszkodzeń radiacyjnych (*dpa*) a parametrem porowatości,
- zastosowała rozszerzony model Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) do symulacji numerycznych procesu deformacji materiałów porowatych w testach indentacyjnych. Model GTN został zwalidowany pod kątem przydatności do opisu ewolucji uszkodzeń radiacyjnych,
- model sprężysto-plastyczny z uszkodzeniami w FEM został wykalibrowany w oparciu o przytoczone rozwiązanie analityczne Sneddona (benchmark).

W autorskiej pracy [A4] Habilitantka rozpatruje pełzanie napromieniowanych materiałów w ekstremalnie niskich temperaturach. Jest to ważny praktyczny problem, gdyż pełzania w temperaturach kriogenicznych (ciekły azot 77 K, ciekły hel 4,2 K) nie można

przewidzieć na podstawie ekstrapolacji przewidywań klasycznych modeli efektywnych dla wyższych temperatur wskutek odmienności mechanizmów zachodzenia tych procesów. Analizowany problem jest nowatorski w kontekście rozpoznania mechanizmów fizycznych zachodzących w temperaturach kriogenicznych prowadzących do ewolucji defektów wywołanych promieniowaniem w warunkach występowania naprężeń (działania obciążeń mechanicznych). Autorka analizuje fizyczne mechanizmy pełzania niskotemperaturowego wykorzystując pomysł, że dyslokacja może przejść przez barierę potencjału z uwagi na efekt tunelowania kwantowo-mechanicznego. Uwzględnia pełzanie powstałe wskutek rozszerzania się pętli dyslokacji wywołanych promieniowaniem. Zaproponowała prawo kinetyczne ewolucji pętli dyslokacji na podstawie mechanizmu rozwoju linii dyslokacji nad wzniesieniami naprężeń Peierlsa. Uwzględnia również pełzanie powstałe w wyniku sprężystego oddziaływania punktowych uszkodzeń wywołanych promieniowaniem z istniejącymi dyslokacjami w materiale. Przedstawiono wzorami i graficznie przewidywane szybkości pełzania w funkcji naprężeń i parametru dpa , które wymagają jeszcze eksperymentalnego zweryfikowania za pomocą danych z napromieniowanych materiałów. Ponadto opracowano nowy konstytutywny model pełzania w niskich temperaturach w nienapromieniowanych materiałach. Uwzględnienie efektu tunelowania dyslokacji kwantowo-mechanicznej dało możliwość rozszerzenia modelu na zakres temperatur ciekłego helu. W przypadku materiałów nienapromieniowanych Autorka przedstawiła model obliczeniowy i wyznaczone wg niego krzywe pełzania, doświadczalnie zwalidowane dla miedzi i stali nierdzewnej w temperaturze kriogenicznej.

Praca [A5], *A peridynamic elasto-plastic damage model for ion-irradiated materials*, przedstawia zastosowanie intensywnie rozwijanej obecnie perydynamiki do modelowania materiałów napromieniowanych jonami w zakresie sprężysto-plastycznego modelu z uszkodzeniem. Można tu dodać, że perydynamika to nielocalne sformułowanie mechaniki kontinuum, które jest próbą wypełnienia luki między teoriami atomowymi materii a klasyczną lokalną mechaniką kontinuum materialnego. Podejście to umożliwia efektywne modelowanie materiałów z nieciągłościami, defektami, niejednorodnościami, w tym powstawanie mikropęknięć, rys oraz ich propagację. Miernikiem zakresu nielokalności tej teorii jest parametr skali długości będący promieniem horyzontu, czyli wielkości otoczenia oddziałującego na dany punkt materialny. Praca ta przedstawia wyniki badań w ramach pozyskanego przez Habilitantkę grantu z Narodowego Centrum Nauki (Sonata Bis 10) na badania mechanizmów fizycznych związanych ze zmianami właściwości mechanicznych materiałów poddanych napromieniowaniu. Do ewolucji sprężysto-plastycznego zachowania materiału z porowatością spowodowaną napromieniowaniem użyto kryterium plastyczności Gursona-Tvergaarda-Needlemana (GTN) z odpowiednio sformułowanym umocnieniem radiacyjnym. Zmienna uszkodzenia zdefiniowana jest tu geometrycznie na poziomie cząstki perydynamicznej jako względna objętość nieciągłości powstałych w objętości cząstki. Zmienna ta określa zmniejszenie efektywnej zdolności przenoszenia siły, wywołane efektem sprężenia ewolucji uszkodzeń i przyrostu wydłużenia wiązania. Habilitantka podaje prawo ewolucji porowatości radiacyjnej w perydynamicie. Osiągnięcie przez zmienną uszkodzenia wartości krytycznej dla danej cząstki perydynamicznej prowadzi do zerwania wiązań związanych z tą cząstką i w konsekwencji do powstania mikropęknięcia materiału.



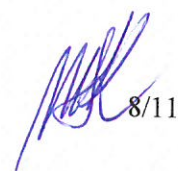
Opracowany perydynamiczny model sprężysto-plastyczny z uszkodzeniem materiałów poddanych napromieniowaniu charakteryzuje się następującymi własnościami:

- uszkodzenia, w postaci nano-/mikro-pustek, są uwzględnione w modelu na poziomie cząstki perydynamicznej,
- fizyczne znaczenie rozwoju uszkodzeń jest rozumiane jako względny wzrost pustek (porowatości) w cząstce perydynamicznej,
- wzrost mikrodefektów prowadzi do osłabienia wiązań międzycząstkowych, tym samym do zmniejszenia efektywnej zdolności przenoszenia siły wiązania wskutek sprężenia ewolucji parametru uszkodzenia i przyrostu odległości między cząstkami,
- lokalizacja i ewolucja uszkodzeń kontrolowana jest przez równanie ruchu i zastosowane relacje konstytutywne uwzględniające pustki w sieci krystalograficznej i pętlę dyslokacji: model sprężysto-plastyczny GTN z prawem umocnienia radiacyjnego opartym na dylatacyjnej części energii odkształcenia sprężystego (model umocnienia typu Meckinga-Kocksa).

Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt przeprowadzenia przez Habilitantkę (wraz z współautorami) dopełniających badań eksperymentalnych oraz symulacji komputerowych, które pozwoliły na walidację i kalibrację opracowanego oryginalnego modelu teoretycznego. Eksperymenty laboratoryjne na austenitycznej stali nierdzewnej 310S napromieniowanej ciężkimi jonami (żelaza, niklu, helu), Habilitantka przeprowadziła we współpracy z Uniwersytetem w Oslo. Próbkę została napromieniowana w akceleratorze tandemowym w temperaturze otoczenia jonami Ni z energią 1,5 MeV, jonami Fe z energią 1,5 MeV i jonami He (z energią 1 MeV), przy fluencji odpowiednio $1E14$, $1E15$ i $1E16$ jonów/cm² dla Ni, $1E14$ jonów/cm² dla Fe i $1E15$ jonów/cm² dla He. Warunki te odpowiadały generowaniu gęstości uszkodzeń radiacyjnych w zakresie od 0,02 do 13,22 *dpa* i wywołały grubość zdefektowanej warstwy wynoszącą 1 μ m (wyznaczonej Transmisyjnym Mikroskopem Elektronowym). Do pomiaru właściwości mechanicznych napromieniowanej warstwy Habilitantka zastosowała technikę nanoindentacji, przeprowadzając badania we współpracy z Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku. Symulacje perydynamiczne, wykonane przez program komputerowy napisany w języku C++ przez pierwszego Autora [A5], dla różnych wartości poziomu uszkodzenia (wartości parametru *dpa*) i materiału nienapromieniowanego jako przypadku referencyjnego, potwierdziły poprawność proponowanego konstytutywnego modelu i komputerowego programu do obliczeń numerycznych.

Odnosnie dodatkowej pracy [D.1], poza cyklem prac [A1 – A5], do której Habilitantka odwołuje się w autoreferacie a która ukazała się 6 września 2024r., chciałbym tylko odnotować, że zawiera ona bogate wyniki autorskich symulacji komputerowych metodami atomistycznej dynamiki molekularnej i szeroko zakrojonych badań doświadczalnych, których celem było przebadanie podstawowych mechanizmów interakcji między defektami wywołanymi promieniowaniem, w tym pustkami przestrzennymi i pętlami dyslokacji, które przyczyniają się do efektu utwardzania przez napromienianie.

Lektura autoreferatu wskazuje, że był przygotowywany chyba w pewnym pośpiechu, dlatego chciałbym wskazać m.in. na następujące niedopatrzenia:



8/11

- U1) niespójny opis z numerami publikacji [A4] i [A5] na liście,
- U2) niejednolity zapis angielskiego słowa „*peridynamics*” oraz jego pochodnych „*peridynamic*” i „*peridynamical*” w j. polskim w autoreferacie, gdzie Habilitantka używa zapisu „peridynamika” i okazynie „perydynamika” i ich pochodne wyrazy,
- U3) różnice między modelem Gursona, zastosowanym w [A1], a użytym w następnym pracach modelem Gursona-Tvergaarda-Needlemana (GTN) wymagałyby głębszego omówienia,
- U4) występują powtórzenia argumentacji i opisów w autoreferacie.

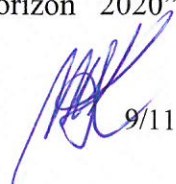
Na podstawie szczegółowej analizy wniosku i wskazanego do oceny cyklu publikacji potwierdzam, że wykonane przez Habilitantkę badania dotyczą złożonego, wieloskalowego, trudnego do modelowania i analizy zagadnienia mechanicznego zachowania się stali (materiałów krystalicznych), napromienianych i poddanych działaniu naprężeń. Na podkreślenie zasługuje w szczególności kompleksowe podejście, które zastosowała Habilitantka (dopełniając w ramach całego cyklu przedłożonych prac), obejmujące opracowanie coraz bardziej złożonego modelu teoretycznego (kilku modeli), rozległe badania doświadczalne wymagające wysoko specjalistycznej aparatury oraz symulacje komputerowe nieliniowych zagadnień z więzami nierównościami. Wskazane uchybienia redakcyjne mają marginalne znaczenie i nie obniżają w żadnej mierze mojej pozytywnej oceny wniosku.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że dr inż. Anecie Ustrzyckiej udało się uzyskać oryginalne wyniki, użyteczne z punktu widzenia zastosowań w praktyce inżynierskiej (reaktory jądrowe, akceleratory cząstek lub detektory). Pozytywnie oceniam uzyskane przez Habilitantkę wyniki badań i popieram Jej wniosek.

3. Ocena dorobku i aktywności naukowej, dydaktycznej i organizacyjnej

Jako uzupełnienie cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych, Habilitantka wykazuje dziewięć publikacji naukowych znajdujących się w bazie Journal Citation Reports [B1 – B9]. Prace te zostały opublikowane w renomowanych czasopismach w roku 2012 lub później. Pięć prac z tej listy [B2, B4, B7 – B9] dotyczy zagadnień pełzania i optymalnego projektowania wirującej pierścieniowej tarczy (jedna praca dotyczy pręta), z uwagi na czas zniszczenia ciągłego. Są to więc publikacje nawiązujące do tematyki badań będącej przedmiotem pracy doktorskiej Habilitantki obronionej w 2012 roku. Ponadto, Habilitantka wykazuje cztery publikacje spoza bazy JCR, wszystkie te publikacje dotyczą tematyki doktoratu, trzy z nich zostały opublikowane przed obroną pracy doktorskiej (2006, 2009, 2011). Aktywność publikacyjną Habilitantki dopełniają publikacje w postaci sześciu rozdziałów w monografiach naukowych [M1 – M6], które ukazały się kolejno w latach 2012, 2015, 2018 (3 prace), 2020. W autoreferacie podano, że liczba cytowań publikacji według bazy Scopus wynosi 120 (bez autocytowań 94) i indeks $h=6$, natomiast według bazy Web of Science: 79 cytowań (59 bez autocytowań) i $h=6$.

Habilitantka została dwukrotnie zaproszona do wygłoszenia referatu sekcyjnego na 19th International Conference on Experimental Mechanics w Krakowie (17-21.07.2022) oraz referatu w ramach „NOMATEN project from the European Union Horizon 2020”



9/11

(09.03.2021). Ponadto wygłosiła 14 referatów na konferencjach międzynarodowych (6 w kraju, 8 za granicą) oraz była współautorką trzech referatów na konferencjach zagranicznych.

Na podkreślenie zasługuje aktywność Habilitantki w zakresie realizacji projektów (grantów), w szczególności kierowanie projektem badawczym NCN *Multiscale constitutive modelling of irradiation effect on mechanical properties of austenitic stainless steels* (początek 25.03.2021 r., okres realizacji 3 lata.), który był realizowany w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN, oraz uczestnictwo jako wykonawca w dwóch projektach NCN: (1) *Complex multiscale constitutive model of irradiated multiphase and composite materials applied at extremely low* (Politechnika Krakowska, 2014-2017), oraz (2) *Elaboration of fundamentals of a new, interdisciplinary method for monitoring of damage development of materials on the basis of structural defects investigation* (IPPT PAN, 2015-2019). Ponadto była wykonawcą w projekcie europejskim *High Intensity Neutrino Oscillations Facility in Europe, EUROnu* (2008-2012).

Habilitantka odbyła dwa 3-tyg. staże i jeden 2-tyg. staż w ośrodku badań jądrowych CERN w Szwajcarii. Umiejętność współpracy nabyła uczestnicząc w projektach i kierując projektem badawczym, Habilitantka współpracowała z innymi jednostkami badawczymi: Narodowym Centrum Badań Jądrowych Otwock-Świerk, Politechniką Krakowską, Politechniką Warszawską, Uniwersytetem w Oslo, Centrum Doskonałości NOMATEN, oraz z CERN.

Działalność organizacyjna Habilitantki na rzecz społeczności akademickiej jest skromna i ogranicza się do udziału w pracach sekretariatu konferencji ICEM19 (Kraków 2022).

Aktywność dydaktyczna Habilitantki miała miejsce w okresie 4 lat pracy w Politechnice Krakowskiej, gdzie prowadziła zajęcia dydaktyczne w j. pol. i j. angielskim z następujących przedmiotów: Wytrzymałość materiałów, Biofizyka, Engineering mathematics, Quantum mechanics and fundamentals of accelerator design.

Podsumowując, pozytywnie oceniam dorobek, aktywność naukową i dydaktyczną dr inż. Anety Ustrzyckiej. Szczególną uwagę zwraca Jej udział w wielu grantach badawczych i pełnienie roli kierownika projektu badawczego NCN, który zrealizowała we współpracy z innymi ośrodkami badawczymi w kraju i zagranicą.

4. Wniosek końcowy

Konkludując stwierdzam, że przedłożony w postępowaniu habilitacyjnym cykl pięciu artykułów naukowych powiązanych tematem „Wieloskalowe modelowanie konstytutywne wpływu promieniowania na właściwości mechaniczne materiałów sprężysto-plastycznych” oraz dodatkowy dorobek naukowy dr inż. Anety Ustrzyckiej stanowią istotny wkład w rozwój inżynierii mechanicznej. Habilitantce udało się uzyskać wiele oryginalnych wyników poprzez zastosowanie koncepcji modelowania wieloskalowego i badań eksperymentalnych. Moim zdaniem, osiągnięcia i dorobek naukowy Habilitantki spełniają wymogi Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r.: Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 478 z dnia 16 marca 2021 r.). Na podkreślenie zasługuje aplikacyjny charakter opracowanych modeli teoretycznych



10/11

i otrzymanych wyników, które są użyteczne w projektowaniu elementów konstrukcyjnych poddanych napromieniowaniu (reaktory jądrowe, akceleratory cząstek lub detektory).

Stawiam wniosek o przyjęcie przedstawionego cyklu pięciu powiązanych tematycznie artykułów naukowych oraz pozostałego dorobku naukowego i dopuszczenie dr inż. Anety Ustrzyckiej do dalszych etapów postępowania celem nadania stopnia doktora habilitowanego nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna.



prof. Mieczysław Kuczma



11/11