

Autoreferat

1. Imię i Nazwisko: Wojciech Moćko

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

Tytuł inżyniera:

Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, specjalność: Systemy pomiarowo kontrolne, 2002

Tytuł magistra inżyniera:

Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, specjalność: Elektronika, 2004

Tytuł doktora nauk technicznych w dziedzinie elektrotechniki:

Temat doktoratu: Zastosowanie scalonych przetworników obrazu do analizy kolorymetrycznej, 2008-04-09, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych.

11.04.2003-obecnie, Instytut Transportu Samochodowego (ITS), adiunkt

01.03.2011-01.03.2014, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN (IPPT PAN), adiunkt

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

Monotematyczny cykl publikacji pt.

„Zastosowanie metody pręta Hopkinsona do analizy wpływu wstępnych obciążeń zmęzeniowych na lepko-plastyczne charakterystyki stali i stopów”

b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa)

1. **W. Moćko**, Z. L. Kowalewski, Dynamic Compression Tests – Current Achievements and Future Development, Engineering Transactions 59, 2011, 1-14
IF=0; punkty MNiSW=6
2. **W. Moćko**, Z.L. Kowalewski, Application of FEM in assessments of phenomena associated with dynamic investigations on miniaturized DICT testing stand., Kovove Materialy 51, 2013, 71–82
IF=0,687; punkty MNiSW=20
3. **W. Moćko**, Analysis of the impact of the frequency range of the tensometer bridge on the results of the measurement by the Split Hopkinson Pressure Bar. Metrology and Measurement Systems 20, 2013, 555–564.
IF=0,982; punkty MNiSW=20

4. **W. Moćko**, Z.L. Kowalewski, Perforation test as an accuracy evaluation tool for a constitutive model of austenitic steel. Archives of Metallurgy and Materials 58, 2013, 1105-1110.
IF=0,431; punkty MNiSW=20
5. **W. Moćko**, Comparison of energy absorption properties of high nitrogen austenitic steel and cast alloy determined using low velocity perforation test, Archives of Metallurgy and Materials 59, 2014, 65-69.
IF=0,431; punkty MNiSW=20
6. **W. Moćko**, J. A. Rodríguez-Martínez, Z. L. Kowalewski, A. Rusinek, Compressive viscoplastic response of 6082-T6 and 7075-T6 aluminium alloys under wide range of strain rate at room temperature: Experiments and modelling , Strain 48, 2012, 498-509.
IF=0,619; punkty MNiSW=35
7. **W. Moćko**, J. Janiszewski, M. Grązka. Application of an extended Rusinek-Klepaczko constitutive model to predict the mechanical behavior of 6082-T6 aluminum under Taylor impact test conditions, Journal of Strain Analysis of Engineering Design 48, 2013, 364–375.
IF=0,881; punkty MNiSW=25
8. **W. Moćko**, J. Janiszewski, M. Grązka, J. Radziejewska. Comparison of impact loading conditions during symmetric and non-symmetric Taylor test of 6082-T6 aluminium alloy , International Journal of Impact Engineering 75, 2015, 203-213,
IF=2.201; punkty MNiSW=40
9. **W. Moćko**, The influence of stress-controlled tensile fatigue loading on the stress-strain characteristics of AISI 1045 steel, Materials and Design 58, 2014, 145–153.
IF=2,913; punkty MNiSW=35
10. **W. Moćko**, Z.L. Kowalewski, Evolution of the tensile properties of the TiAl6V4 alloy due to the prior cyclic loading history, Journal of Theoretical and Applied Mechanics 52, 2014, 847-851.
IF=0,402; punkty MNiSW=15
11. **W. Moćko**, A. Brodecki, L. Kruszka, Mechanical response of dual phase steel at quasi-static and dynamic tensile loadings after initial fatigue loading, Mechanics of Materials, DOI: 10.1016/j.mechmat.2015.07.015
IF=2,329; punkty MNiSW=40
12. **W. Moćko**, A. Brodecki, J. Radziejewska, Effects of pre-fatigue on the strain localization during tensile tests of DP 500 steel at low and high strain rates, Journal of Strain Analysis of Engineering Design, DOI: 10.1177/0309324715599132
IF=0,909; punkty MNiSW=25

Suma Impact Factor:	12,354
Suma punktów MNiSW:	301

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Jako pracownik Instytutu Transportu Samochodowego (ITS), w toku swojej działalności naukowej zajmowałem się szerokim spektrum badań naukowych oraz stosowanych związanych z motoryzacją i transportem. Od pewnego czasu jednym z wiodących zagadnień w transporcie jest ograniczenie liczby wypadków śmiertelnych oraz ciężkich uszkodzeń ciała poprzez zastosowanie bezpiecznej infrastruktury drogowej oraz nowoczesnych konstrukcji samochodów, które chronią pasażerów w trakcie zderzenia. W związku z tym w ostatnich latach skupiłem swoją uwagę na problematyce związanej z badaniami materiałów konstrukcyjnych w warunkach obciążeń udarowych, tj. przy dużych szybkościach odkształcania.

Pierwsza metoda eksperymentalna, która umożliwiła badanie właściwości mechanicznych materiałów przy dużych szybkościach odkształcania, nazwana od nazwiska jej twórcy prętem Hopkinsona, została zaprezentowana sto lat temu [1], a następnie zmodyfikowana przez Kolskyego do postaci stosowanej obecnie [2]. Pomimo długiej historii badań w obszarze inżynierii zderzeniowej, na świecie ciągle prowadzone są i publikowane prace badawcze zarówno w zakresie nowych metod badawczych, jak i charakteryzacji nowych typów materiałów. Tematyka związana z badaniami materiałów przy dużych szybkościach odkształcania jest ostatnio bardzo popularna, ponieważ współczesna inżynieria oparta na wirtualnym prototypowaniu wymaga opracowania szeregu modeli konstytutywnych dla wykorzystywanych w symulacjach materiałów. W Polsce problematyką badań z wykorzystaniem metody pręta Hopkinsona zajmuje się wąska grupa specjalistów z Wojskowej Akademii Technicznej, Politechniki Poznańskiej, Politechniki Warszawskiej, Politechniki Wrocławskiej oraz Instytutu Podstawowych Problemów Techniki (IPPT PAN). Ostatnio, za sprawą prowadzonych przeze mnie prac badawczych oraz rozbudowy laboratorium badań dynamicznych do grona instytucji prowadzących analizy zachowania materiałów przy dużych szybkościach odkształcania dołączył także Instytut Transportu Samochodowego.

Badania właściwości mechanicznych materiałów w warunkach obciążeń udarowych mogą nastęrczać wielu problemów. Pierwszym z nich jest prawie całkowity brak standaryzacji metod badawczych. Dotychczas opracowano tylko jedną normę opisującą próbę rozciągania przy dużych szybkościach odkształcania (PN-EN ISO 26203-1). Natomiast w praktyce wykorzystuje się urządzenia umożliwiające badania w warunkach obciążeń ścinających, ściskających oraz rozciągających, a niekiedy także przy złożonych stanach naprężenia. Wymiary prętów sprężystych, materiał do ich wykonania, uchwyty mocujące, sztywność podstawy, sposób łóżyskowania prętów czy wreszcie geometria i wielkość próbki różnią się w zależności od konkretnego wykonania stanowiska. Rozważając możliwość zastosowania metody pręta Hopkinsona dla konkretnego materiału i kształtu próbki należy wziąć ponadto pod uwagę szereg zjawisk występujących w trakcie pomiaru, które mogą w

mniejszym lub większym stopniu wpłynąć na zmierzone naprężenie plastycznego płynięcia: tarcie, bezwładność, propagacja fali plastycznej i sprężystej, adiabatyczne nagrzewanie czy proces równoważenia sił na brzegach próbki. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na uzyskane wyniki są parametry zastosowanego układu akwizycji danych pomiarowych.

Nakreślone powyżej problemy związane z zaprojektowaniem stanowiska badawczego, jego budową, prowadzeniem badań oraz analizą uzyskanych wyników wskazują, że konkretne rozwiązania konstrukcyjne należy poprzeć szeregiem analiz oraz eksperymentów umożliwiających walidację metody pomiarowej. Tylko takie podejście umożliwia to uzyskanie wiarygodnych i powtarzalnych wyników pomiaru z wykorzystaniem metody pręta Hopkinsona.

Kolejnym zagadnieniem dotychczas prawie w ogóle nie poruszonym w literaturze dotyczącej badań udarowych jest analiza właściwości mechanicznych materiałów poddanych uprzednio wstępnym obciążeniom zmęczeniowym. Do tej pory, poza niewielkimi wyjątkami [8-10], zajmowano się materiałami w stanie dostawy, podczas gdy w rzeczywistej eksploatacji konstrukcje energochłonne i zabezpieczające poddawane są obciążeniom zmęczeniowym, które mogą wpływać na właściwości mechaniczne. W związku z tym mogą wystąpić rozbieżności pomiędzy wynikami symulacji wykonanej dla materiału w stanie dostawy, a rzeczywistym działaniem rzeczywistej konstrukcji w czasie zderzenia. Zaprezentowane przeze mnie w dalszej części wyniki badań wskazują, że w określonych warunkach quasi-statyczne jak i dynamiczne krzywe naprężenie-odkształcenie mogą się zmieniać pod wpływem wstępnych obciążeń zmęczeniowych.

Celem naukowym zaprezentowanych przez mnie badań było stworzenie warsztatu naukowego oraz opracowanie metodyki badawczej umożliwiającej prowadzenie badań dotyczących lepko-plastycznych właściwości materiałów. Następnie opracowana metodyka została zwalidowana poprzez zastosowanie uzyskanych wyników do analizy zjawisk zachodzących w trakcie klasycznego i symetrycznego testu Taylora takich jak: inicjacja uszkodzeń oraz propagacja fali plastycznej. Rozwinięciem analiz, które dotyczyły badania właściwości mechanicznych materiałów w stanie dostawy było przeprowadzenie badań, których celem było określenie wpływu wstępnego obciążenia o charakterze zmęczeniowym na charakterystykę rozciągania materiału w quasi-statycznych jak i dynamicznych warunkach deformacji.

Przedstawiona przeze mnie praca składa się z cyklu publikacji. Zaprezentowano w nich wyniki badań naukowych przeprowadzonych w trakcie opracowywania metodyki umożliwiającej badania metodą pręta Hopkinsona, która została wdrożona w Instytucie Transportu Samochodowego oraz w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN. Zakres przeprowadzonych analiz obejmował: ocenę możliwości zastosowania zminiaturyzowanej metody bezpośredniego uderzenia w próbkę do charakteryzacji materiałów w zakresie szybkości odkształcania powyżej 10^4 s^{-1} , aspekty związane z wpływem układu pomiarowego oraz kształtu pocisku na wynik pomiarów, opracowanie nowej metody

oceny dokładności równań konstytutywnych, wykorzystanie wyników uzyskanych za pomocą pręta Hopkinsona do analizy mechanizmów deformacji w trakcie przebijania blachy, a także zastosowanie testu Taylora do walidacji wyników uzyskanych w szerokim zakresie szybkości odkształcania z wykorzystaniem opracowanej metodyki. W drugiej części pracy opracowany warsztat naukowy został wykorzystany do wyznaczenia charakterystyk naprężenie-odkształcenie nie tylko dla materiałów w stanie dostawy, ale także dla materiałów uprzednio poddanych obciążeniom zmęczeniowym.

Pierwszym etapem prowadzonych przeze mnie badań naukowych była analiza możliwości wyznaczenia krzywych naprężenie-odkształcenie przy szybkościach odkształcania znacznie przekraczających 10^4 s^{-1} . Pręt Hopkinsona w wersji przedstawionej przez Kolskyego (SHPB - Split Hopkinson pressure bar) w typowej konfiguracji pozwala na uzyskanie szybkości odkształcania mniejszych od $5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$. Jednak w wielu zastosowaniach praktycznych związanych z uzbrojeniem, turbinami, lotnictwem czy astronautyką jest to niewystarczające, ponieważ występujące tam deformacje plastyczne zachodzą w dużo krótszym czasie. Osiągnięcie szybkości odkształcania powyżej 10^4 s^{-1} wymagało miniaturyzacji oraz zmiany konfiguracji stanowiska do wersji nazywanej zminiaturyzowaną metodą bezpośredniego uderzenia w próbkę (ang. MDICT - Miniaturized Direct Impact Compression Test Method). Pociągało to za sobą konieczność zaprojektowania i wykonania urządzenia, a następnie opracowania metodyki badawczej i jej walidacji. Urządzenie, będące jedną z kolejnych modyfikacji pręta Hopkinsona, umożliwiające uzyskanie dużo większych niż w przypadku klasycznego pręta Kolskyego szybkości odkształcania opracowano w ramach wcześniejszych prac w IPPT PAN [3]. Wykorzystując stanowisko MDICT przeprowadziłem próby ściskania, których celem było uzyskanie jak największej szybkości odkształcania. W badaniach wykorzystano polikrystaliczny tantal, którego charakterystyki mechaniczne w zakresie bardzo dużych szybkości odkształcania są niezwykle istotne, ponieważ jest często stosowany w pociskach formowanych wybuchowo. Wyniki tych badań zaprezentowałem w pracy [H1]. Znaczna miniaturyzacja próbki (1,5 mm średnicy, 0,5 mm grubości) połączona z dużą prędkością początkową pocisku, rzędu 150 m/s, pozwoliła na uzyskanie szybkości odkształcania równej $2,2 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$. **Warto podkreślić, że w momencie publikacji wyników pracy, była to największa szybkość odkształcania dla polikrystalicznego tantalu dostępna w danych literaturowych. Dzięki połączeniu wyników uzyskanych metodą MDICT z innymi technikami badawczymi, takimi jak: pręt Kolskyego oraz ściskanie z użyciem maszyny serwo-hydraulicznej możliwe było wykreślenie charakterystyki opisującej wrażliwość naprężenia plastycznego płynięcia tantalu na szybkość odkształcania w bardzo szerokim zakresie wynoszącym od 10^{-4} s^{-1} do $2,2 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$.**

Pomimo, że sam eksperyment zakończył się sukcesem, tj. wyznaczeniem charakterystyk materiałowych przy bardzo dużych szybkościach odkształcania, to jednak ciągle otwartym problemem pozostawała kwestia oszacowania wielkości wpływu szeregu niekorzystnych zjawisk występujących w trakcie próby ściskania na zmierzoną charakterystykę naprężenia plastycznego płynięcia. Wpływ tarcia, bezwładności, adiabatycznego nagrzewania,

ograniczonej szybkości propagacji fali mechanicznej w próbce czy dyspersji fali sprężystej w prętach, może zależeć zarówno od konfiguracji stanowiska, jak i właściwości badanego materiału, przy czym niektóre efekty są szczególnie silne przy bardzo dużych szybkościach odkształcania, jakie występują podczas badań metodą MDICT. Tradycyjnie stosowane w klasycznej konfiguracji pręta Kolskyego metody walidacji, które wykorzystują m.in. pomiary optyczne czy tzw. analizę trójfalową, nie mogą być zastosowane w metodzie MDICT z powodu znacznej miniaturyzacji stanowiska oraz braku pręta inicjującego. W związku z tym należało opracować alternatywną metodę oceny zjawisk towarzyszących deformacji próbki z wykorzystaniem metody MDICT. Metoda, którą zaproponowałem, wykorzystuje model stanowiska MDICT opracowany w środowisku ABAQUS [H2].

Przeprowadzone badania wykazały że:

- zastosowane w metodzie MDICT zmniejszenie wymiarów stanowiska oraz próbki, pomimo bardzo dużych szybkości odkształcania, pozwoliło na ograniczenie wpływu bezwładności na zmierzoną wartość naprężenia plastycznego płynięcia do 1%, dalsza redukcja błędu spowodowanego bezwładnością jest możliwa z wykorzystaniem rozwiązania analitycznego zaproponowanego przez Klepaczko [4];
- zastosowanie analitycznej metody korekcji wpływu nagrzewania adiabatycznego pozwala na zmniejszenie błędu pomiaru naprężenia z 16% do 2%;
- wpływ tarcia pomiędzy próbką a pociskiem, oraz próbką a prętem transmisyjnym na zmierzoną charakterystykę naprężenia może być zmniejszony z wykorzystaniem odpowiednich zależności analitycznych z 20% do 1%;
- wpływ zmian szybkości odkształcania w trakcie procesu deformacji na zmierzone naprężenie wynosił ok. 3% przy wartości odkształcenia równej 0,6;
- czas potrzebny do uzyskania kluczowego w metodzie Hopkinsona warunku równowagi sił na brzegach próbki jest równy 1 μ s;
- różnice zmierzonych wartości naprężenia dla różnych geometrii próbki są mniejsze od 5% w stosunku do rzeczywistej charakterystyki naprężenie-odkształcenie badanego materiału.

W podsumowaniu pierwszego etapu prac należy stwierdzić, że przeprowadzone przeze mnie badania, dotyczące wykorzystania metody MDICT do wyznaczania charakterystyki mechanicznej materiałów w zakresie szybkości odkształcania powyżej 10^4s^{-1} , pozwoliły na uzyskanie krzywych ściskania polikrystalicznego tantalu przy szybkości odkształcania równej $2,2 \times 10^5\text{s}^{-1}$ oraz identyfikację i określenie wielkości wpływu poszczególnych czynników towarzyszących deformacji próbki na zmierzoną wartość naprężenia plastycznego płynięcia.

Kolejny etap mojej działalności naukowej w obszarze badań dynamicznych był związany z tworzeniem w ITS laboratorium badań udarowych. Stanowiska przeznaczone do badania właściwości materiałów przy dużych szybkościach odkształcania, wykorzystujące metodę opracowaną przez Hopkinsona nie są urządzeniami znormalizowanymi. Ich wymiary, zasada

działania, materiał z którego wykonuje się pręty robocze, a także zastosowane oprzyrządowanie zależą od potrzeb, wiedzy i doświadczenia projektantów i wykonawców. Zastosowana w ITS konfiguracja stanowiska (pręt robocze 2000 mm x 20 mm ze stali maraging) wynikała z przeglądu literatury oraz założonego obszaru zastosowań, który obejmował badania stali i stopów aluminium na potrzeby przemysłu motoryzacyjnego i infrastruktury drogowej. O ile metodyka badawcza w przypadku wybranej konfiguracji jest sprawdzona i można ją uznać za zwalidowaną, o tyle problem stanowił układ pomiarowy, którego zadaniem jest pomiar przebiegu fali sprężystej w prętach. Bardzo trudno znaleźć w literaturze informacje i analizy dotyczące wpływu pasma przenoszenia układu akwizycji danych na uzyskane wyniki pomiaru. Aby wypełnić tę lukę i jednocześnie wyposażyć budowane stanowisko w tor pomiarowy, którego wpływ na wyniki pomiaru będzie jak najmniejszy i dokładnie określony, przeprowadziłem szczegółową analizę dotyczącą kształtu pręta-pocisku oraz pasma przenoszeniu układu pomiaru w kontekście wyznaczonych charakterystyk naprężenie-odkształcenia. Wpływ kształtu pocisku na przebieg fal sprężystych jest szeroko opisywany w literaturze, choćby jako jedna z metod kształtowania impulsu obciążającego. Jednak już wzajemny wpływ kształtu pocisku, szerokości pasma częstotliwości wygenerowanego impulsu oraz pasma przenoszenia układu pomiarowego były analizami nowatorskimi, wcześniej niepublikowanymi. Ocena została przeprowadzona na przykładzie konfiguracji stanowiska znajdującego się w ITS (pręty o średnicy 20 mm) z użyciem MES [H3]. Ponieważ kształt pocisku generującego falę sprężystą w prętach ma wpływ na przebieg impulsu obciążającego oraz kształt widma częstotliwościowego, badania przeprowadzono dla trzech geometrii zakończenia pręta-pocisku tj. płaskiego końca, zaokrąglonego do promienia równego 1 cm oraz zaokrąglonego do promienia równego 3 cm. Zmniejszenie promienia zaokrąglenia zmniejsza oscylacje spowodowane dyspersją fali sprężystej, która jest zjawiskiem niepożądanym, a ponadto niezwiązanym z właściwościami badanego materiału. Jednak z drugiej strony mniejszy promień skutkuje wolniejszym czasem narastania impulsu fali obciążającej, a co za tym idzie czasem ustalania się zadanej szybkości odkształcania, która powinna być stała. **Jako optymalne pasmo przenoszenia z punktu widzenia kosztu aparatury oraz dokładności pomiarów uznano wartość 50 kHz. Na podstawie przeprowadzonej przeze mnie analizy dokonano wyboru układu akwizycji danych (mostek tensometrycznych Vishay 2300 z oscyloskopem cyfrowym Agilent DSO7014) oraz zaprojektowano kształt prętów-pocisków generujących sprężystą falę obciążającą.**

Pręt Hopkinsona jest jednym z urządzeń wykorzystywanych do charakteryzacji materiałów w szerokim zakresie temperatur i szybkości odkształcania, która w dalszej kolejności umożliwia kalibrację wybranego równania konstytutywnego. Poprawnie wyznaczone wartości współczynników modelu pozwalają na przeprowadzenie symulacji MES, której wyniki będą niewiele odbiegać od rzeczywistych. Aby dokonać walidacji modelu konstytutywnego należy przeprowadzić niezależny eksperyment, np. test Taylora, w trakcie którego materiał jest poddawany silnym odkształceniom w warunkach adiabatycznych. Ponieważ w ITS nie ma technicznych możliwości do przeprowadzenia testu Taylora należało

zapropozować inne rozwiązanie problemu walidacji zależności konstytutywnych. Procedura, którą opisałem w pracy [H4], wykorzystuje test przebijania przeprowadzony z użyciem młota opadowego Instron 9250, wyposażonego w stożkowy bijak. Przedstawiona przeze mnie koncepcja została sprawdzona na przykładzie blachy wykonanej ze stali X4CrMnN16-12 oraz trzech wybranych zależności konstytutywnych opisujących jej właściwości mechaniczne. Próbkę wykonaną ze stali zostały poddane badaniom w warunkach obciążeń ściskających w szerokim zakresie szybkości odkształcania oraz próbie zrywania. W zakresie badań dynamicznych wykorzystano zbudowany wcześniej w ITS pręt Kolskyego. Następnie otrzymane wyniki posłużyły do kalibracji różnych modeli konstytutywnych takich jak: Johnsona-Cooka (JC), Zerilli-Armstronga (ZA) oraz Rusinka-Klepaczko (RK). W dalszej kolejności blachę poddano próbie przebijania z zastosowaniem szybkości początkowej bijaka 12,5 m/s oraz energii 500J. Przebieg eksperymentu został zasymulowany z wykorzystaniem MES, przy czym jako model lepko-plastyczny blachy wykorzystano poszczególne równania wykalibrowane w pierwszym etapie badań. Jako miarę opisującą zgodność danego modelu z danymi eksperymentalnymi zastosowano różnicę pomiędzy rzeczywistą, a obliczoną prędkością bijaka w trakcie testu przebijania. Otrzymane wyniki były zgodne z metodą referencyjną tj. najlepszą zgodność uzyskano dla modelu Rusinka-Klepaczko, a najgorszą dla modelu Zerilli-Armstronga. **W wyniku przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że opracowana przeze mnie metoda oceny dokładności równania konstytutywnego może być stosowana w praktyce.**

Zaprezentowane dotychczas prace dotyczyły konstrukcji stanowisk umożliwiających badania z użyciem metody opracowanej przez Hopkinsona oraz oceny dokładności uzyskanych wyników. Podsumowaniem dotychczas przeprowadzonych przeze mnie analiz było sprawdzenie możliwości zastosowania opracowanej metodyki badawczej do analizy porównawczej właściwości energochłonnych blachy austenitycznej VP159 (X4CrMnN16-12) ze staliwem LH556 [H5]. Wykorzystana w badaniach metodyka obejmowała konstrukcję stanowiska (pręt Kolskyego), procedurę umożliwiającą analizę wyników oraz ich walidację oraz procedurę kalibracji zależności konstytutywnych. Przeprowadzone z wykorzystaniem młota opadowego badania wykazały, że pierwszy z wymienionych materiałów absorbuje całą energię kinetyczną uderzenia (500J) natomiast drugi tylko ok. 350 J. Analiza właściwości mechanicznych obu materiałów wykonana przy użyciu pręta Hopkinsona wykazała porównywalne wartości naprężenia granicy plastyczności w warunkach dynamicznych, jednak w przypadku stali austenitycznej odkształcenie próbki potrzebne do jej zerwania było znacznie większe (0,4) w porównaniu do staliwa (0,017). Stwierdzono także różnice w mechanizmie przebijania blachy. Dla stali austenitycznej obserwowano odkształcenie plastyczne, a następnie formowanie tzw. płatków, natomiast dla staliwa stożkowy bijak powodował w trakcie przebijania powiększanie otworu spowodowane odrywaniem kolejnych fragmentów materiału. W ostatnim etapie badań przeprowadzono symulację numeryczną eksperymentu z wykorzystaniem środowiska ABAQUS/Explicit, wykorzystując lepko-plastyczny model Johnsona-Cooka wykalibrowany z wykorzystaniem opracowanej wcześniej metody badawczej. **Obliczone wyniki wykazały dobrą zgodność z danymi**

eksperymentalnymi zarówno w zakresie wyznaczania pochłanianej energii jak i mechanizmów przebijania blachy, co potwierdziło prawidłowość badań eksperymentalnych przeprowadzonych przy dużych szybkościach odkształcania.

Przedstawiona dotychczas metoda badawcza umożliwiająca wyznaczanie charakterystyk materiałowych w warunkach obciążeń uderowych [H1-H3] została zastosowana do analizy mechanizmów deformacji plastycznej podczas próby przebijania [H4-H5]. Jak pokazały wyniki symulacji komputerowej występujące w próbie przebijania szybkości odkształcania były mniejsze od $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$. Ponieważ, jak udowodniłem w pracach [H1, H2], stworzona przeze mnie baza laboratoryjna umożliwia prowadzenie eksperymentów i analiz dla znacznie większych szybkości odkształcania, rzędu $2 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$, dlatego kolejnym krokiem w przeprowadzonych przeze mnie badaniach naukowych było sprawdzenie takiej możliwości. W tym celu wykonałem szereg prac badawczych, które obejmowały: charakteryzację wybranych stopów aluminium, kalibrację modelu Rusinka-Klepaczko dla szybkości odkształcania powyżej 10^4 s^{-1} oraz test Taylora [5]. Badaniom eksperymentalnym towarzyszyły symulacje numeryczne, które umożliwiły poznanie zjawisk zachodzących podczas poszczególnych badań.

W pierwszej fazie prac dotyczących analizy właściwości mechanicznych materiałów przy bardzo dużych szybkości odkształcania omówione wcześniej metody badawcze (SHPB, MDICT) opisane w pracach [H1-H3] zostały wykorzystane do oceny możliwości zastosowania rozszerzonego modelu Rusinka-Klepaczko do opisu lepko-plastycznych właściwości stopu aluminium typu 6082-T6 oraz 7075-T6 w zakresie szybkości odkształcania powyżej 10^4 s^{-1} [H6]. Dotychczas model ten nie był stosowany dla tak dużych szybkości odkształcania m.in. z powodu braku danych eksperymentalnych pozwalających na kalibrację współczynników równania dla szybkości odkształcania 10^4 s^{-1} . Stało się to możliwe dopiero dzięki wykorzystaniu techniki MDICT. Rozszerzenie zależności RK polegało na dodaniu do oryginalnego równania członu opisującego naprężenie charakterystyczne, które ma istotne znaczenie przy szybkościach odkształcania większych od $5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$. Badania stopów aluminium typu 6082-T6 oraz 7075-T6 przeprowadzono z użyciem serwo-hydraulicznej maszyny wytrzymałościowej, SHPB oraz MDICT w szerokim zakresie szybkości odkształcania od $4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ do ok. $5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$. Analiza została poparta dyskusją dotyczącą wpływu czynników towarzyszących deformacji plastycznej na zmierzoną wartość naprężenia plastycznego płynięcia. Zgodność danych eksperymentalnych z obliczonymi była bardzo dobra w całym zakresie zastosowanych szybkości odkształcania, także dla szybkości odkształcania powyżej 10^4 s^{-1} . **W związku z tym uznano, że rozszerzony model RK może być z powodzeniem stosowany do opisu lepko-plastycznych właściwości stopów 6082-T6 oraz 7075-T6 w zakresie bardzo dużych szybkości odkształcania rzędu $5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$. Należy zwrócić uwagę, że tego typu stwierdzenie w odniesieniu do innych materiałów wymagałoby przeprowadzenia stosownej analizy.**

W dalszej części prac badawczych model Rusinka-Klepaczko skalibrowany dla stopu 6082-T6 w szerokim zakresie szybkości odkształcania posłużył do analizy zjawisk zachodzących w trakcie testu Taylora [H7], w szczególności propagacji fali plastycznej. Badania zostały przeprowadzone w ramach mojej współpracy naukowej z pracownikami Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej i obejmowały testy udarowe w zakresie prędkości początkowych próbek od 204 m/s do 280 m/s. Przebieg uderzenia został zarejestrowany za pomocą szybkiej kamery, co umożliwiło śledzenie propagacji fali plastycznej w trakcie eksperymentu. Wyniki badań zostały porównane z wynikami symulacji MES, w której lepko-plastyczne właściwości materiału opisano zależnością Rusinka-Klepaczko, której współczynniki wyznaczono wcześniej [H6]. Nowością w odniesieniu do wcześniejszych prac opisujących symulacje testu Taylora, było zastosowanie w symulacji MES rozszerzonego modelu RK, wykalibrowanego w szerokim zakresie szybkości odkształcania do $5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ z wykorzystaniem metod SHPB oraz MDICT. Pomimo, że średnia szybkość odkształcania w trakcie uderzenia pocisku w sztywne ciało, obliczona zgodnie z metodyką Taylora, była rzędu $5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ to jednak szczegółowa analiza numeryczna wykazała, że w określonych obszarach próbki i pewnych etapach deformacji odkształcenie zachodzi przy dużo większych szybkościach, przekraczających $1.5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$. Potwierdziło to konieczność zastosowanie modelu konstytutywnego skalibrowanego w tym zakresie szybkości, np. z wykorzystaniem opisanej wcześniej metody MDICT. Przedmiotem szczegółowej analizy opisanej w publikacji [H7] były: obrys próbek po zakończeniu testu przy różnych prędkościach początkowych, obrys próbek zarejestrowany szybką kamerą w czasie testu z prędkością początkową 280 m/s oraz prędkość wolnego końca próbki w trakcie zderzenia dla różnych prędkości początkowych pocisku. **Na podstawie analizy obrazu z szybkiej kamery, a także wykorzystując symulację MES stwierdzono bardzo słabe i szybko zanikające zjawisko propagacji fali plastycznej w stopie 6082-T6, co jest spowodowane słabym umocnieniem odkształceniowym tego materiału. Obliczone wyniki charakteryzują się niewielką rozbieżnością w stosunku do danych eksperymentalnych. Oznacza to, że model RK opisujący lepko-plastyczne właściwości stopu 6082-T5 został prawidłowo skalibrowany w zakresie szybkości odkształcania do $5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$.**

Dalsze badania lepko-plastycznego zachowania się stopu 6082-T6 w warunkach testu Taylora zostały przeprowadzone dla prędkości początkowych próbki w zakresie 280 m/s do 355 m/s. Zwiększenie prędkości początkowej spowodowało, że w próbkach oprócz większych niż poprzednio odkształceń plastycznych można było stwierdzić także powstawanie makroskopowych uszkodzeń. Przy czym charakter uszkodzeń był zdeterminowanych przez zastosowany wariant testu Taylora. W czasie testu klasycznego (rod-on-anvil, uderzenie próbki w sztywne ciało) powstawały tylko pęknięcia radialne, natomiast w czasie testu symetrycznego (rod-on-rod, uderzenie próbki w kontr-próbkę o tych samych wymiarach) powstawały pęknięcia osiowe i radialne. Ponieważ liczba publikacji dotyczących powstawania uszkodzeń osiowych jest niewielka podjąłem próbę przeprowadzenia analizy porównawczej mechanizmów inicjacji uszkodzeń w warunkach symetrycznego i klasycznego testu Taylora [H8]. Warto podkreślić, że w czasie testu Taylora silna deformacja plastyczna

zachodzi w warunkach adiabatycznych przy wysokich szybkościach odkształcania. Dodatkowo uszkodzenia powstające w trakcie zderzenia są inicjowane w warunkach złożonych stanów naprężenia. Złożoność zjawisk występujących w czasie próby Taylora powodują, że bardzo trudno jest przeprowadzić symulację, której wyniki będą zbliżone do rzeczywistości.

W trakcie eksperymentów wykorzystujących symetryczny test Taylora [H8] stwierdziłem, że powyżej prędkości uderzenia równej 185 m/s, w osi próbki blisko odkształcanego brzegu powstają charakterystyczne pustki. Obszar uszkodzenia zwiększał się wraz z prędkością początkową, aż do powstania wyraźnie widocznego krateru o średnicy kilku milimetrów przy prędkości uderzenia równej 235 m/s. Badania metalograficzne przeprowadzona na przekrojach próbek potwierdziły obecność pustek wewnątrz próbek w pobliżu ich osi podłużnej, w odległości kilku milimetrów od powierzchni zderzenia. Pustki te nie pojawiały się jednak w teście typu próbka-kowadło nawet przy najwyższej zastosowanej prędkości uderzenia, która wynosiła do 355 m/s. Powyżej prędkości 280 m/s w teście klasycznym można było zaobserwować jedynie pęknięcia ukośne na obwodzie. W celu analizy zjawisk zachodzących w czasie symetrycznego, jak i klasycznego testu Taylora przeprowadzono symulację zderzenia z użyciem środowiska ABAQUS/Explicit. Przedmiotem badań był przebieg odkształcenia plastycznego oraz trójosiowego stanu naprężenia (ang. stress triaxiality) w czasie uderzenia. Zmienne były wyznaczone dla dwóch elementów siatki: pierwszy był położony w osi próbki w odległości 1 mm od odkształcanego brzegu, natomiast drugi na krawędzi próbki. W wyniku symulacji stwierdzono, że dla obu typów testu Taylora na krawędzi próbki, w wyniku stopniowego zwiększania się średnicy stopki w trakcie deformacji plastycznej występują obciążenia rozciągające. Ze wzrostem odkształcenia rosta także wartość współczynnika trójosiowego stanu naprężenia. Po przekroczeniu pewnej wartości odkształcania następowała inicjacja i rozwój uszkodzenia obserwowany jako pęknięcia w pobliżu krawędzi. Natomiast dla elementu siatki znajdującego się w osi próbki przebieg zmiennej opisującej trójosiowy stan naprężenia był silnie zależny od rodzaju przeprowadzonego eksperymentu. W przypadku testu klasycznego (próbka – kowadło) bezpośrednio po uderzeniu można zaobserwować maksimum współczynnika trójosiowego stanu naprężenia o dodatniej wartości równej ok. 0.7, który odpowiada obciążeniom rozciągającym. Następnie współczynnik ten maleje aż do ujemnych wartości, co oznacza że deformacja zachodzi w warunkach obciążeń ściskających, w których nie ma możliwości zainicjowania uszkodzenia. Z kolei w przypadku testu symetrycznego można zaobserwować charakterystyczne oscylacje przebiegu trójosiowego stanu naprężenia, które spowodowane są nałożeniem w osi próbki sprężystych fal mechanicznych propagujących się od powierzchni próbki. Ponieważ materiał jest odkształcany plastycznie w trakcie kolejnego maksimum trójosiowego stanu naprężenia warunki wymagane do inicjacji uszkodzenia zostają spełnione. Tym samym dochodzi do powstania uszkodzenia osiowego, które zachodzi w warunkach obciążeń rozciągających.

W przedstawionych powyżej szczegółowych analizach MES symetrycznego i klasycznego testu Taylora wykorzystano model RK opisujący lepko-plastyczne właściwości stopu 6082-T6. Do kalibracji modelu wykorzystana została opracowana przeze mnie metodyka badawcza obejmująca konstrukcję stanowiska, analizę wyników i ich walidację. Uzyskane i opublikowane przeze mnie wnioski, dotyczące przebiegu testu Taylora, potwierdziły skuteczność i prawidłowość przeprowadzonych wcześniej prac naukowych.

Ostatnim etapem zrealizowanych przeze mnie prac wchodzących w skład mojego osiągnięcia naukowego była analiza konieczności wyznaczenia charakterystyk lepko-plastycznych dla materiałów poddanych eksploatacji [H9-H12]. Pomysł jest nowatorski, ponieważ dotychczas stosowane badania lepko-plastycznych właściwości materiałów zwykle dotyczyły próbek wykonanych z materiału w stanie dostawy. Zwykle jednak w procesie eksploatacji elementy poddane są obciążeniom o charakterze zmęczeniowym. Zmiany mikrostrukturalne zachodzące w materiale na skutek obciążeń cyklicznych mogą znacznie wpływać na charakterystykę naprężenie-odkształcenie [6, 7]. W dalszej kolejności może to prowadzić do znacznych rozbieżności pomiędzy projektowanym, a rzeczywistym zachowaniem konstrukcji pod wpływem obciążeń udarowych. Ma to szczególnie istotne znaczenie dla elementów zabezpieczających takich jak klatki bezpieczeństwa, czy strefy kontrolowanego zgniotu. Tematyka obejmująca wzajemne korelacje pomiędzy uszkodzeniami zmęczeniowymi, a właściwościami materiału w warunkach obciążeń dynamicznych jest w odniesieniu do światowej literatury we wczesnej fazie rozwoju, pomimo dużego znaczenia praktycznego tego problemu. W związku z tym podjąłem próbę rozszerzenia opracowanej wcześniej dla materiałów w stanie dostawy metodyki badawczej umożliwiającej badanie właściwości lepko-plastycznych na materiały poddane uprzednim obciążeniom cyklicznym. Celem prowadzonych badań, finansowanych przez NCN w ramach grantu SONATA, którego jestem kierownikiem, jest ustalenie wpływu wstępnych obciążeń zmęczeniowych na lepko-plastyczne właściwości materiałów konstrukcyjnych. Pierwsze analizy tego typu zostały przeprowadzone na przykładzie stali typu AISI 1045 [H9]. Charakterystyki rozciągania materiału w stanie dostawy zostały porównane z charakterystykami materiału uprzednio poddanego obciążeniom zmęczeniowym. Liczba cykli wstępnego obciążenia została tak dobrana, aby otrzymać wartość współczynnika CFD (Cumulative Fatigue Damage) równą 0,25; 0,50 oraz 0,75. Zastosowano dwie wartości maksymalne obciążenia równe 550 MPa i 750 MPa w cyklach odzerowych (rozciągających). Stwierdzono, że dla wartości CFD równych 0,25 oraz 0,50 następuje wzrost naprężenia zmierzonego w próbie rozciągania. Jest to spowodowane głównie umocnieniem cyklicznym (obciążenia wstępne o wartości 550 MPa) lub odkształceniowym i cyklicznym (obciążenia wstępne o wartości 750 MPa). Dalszy wzrost liczby cykli wstępnych odpowiadający wartości CFD równej 0,75 powoduje obniżenie zmierzonego naprężenia, co jest spowodowane rozwojem uszkodzenia zmęczeniowego. Analiza polegająca na przeprowadzeniu próby rozciągania przy różnych szybkościach odkształcania wykazała, że rozwój uszkodzenia zmęczeniowego wpływa także na wrażliwość naprężenia plastycznego płynięcia na szybkość odkształcania.

Podobne badania, dotyczące wpływu cyklicznych obciążeń wstępnych na charakterystykę rozciągania przeprowadziłem także dla stopu tytanu Ti6Al4V [H10]. W trakcie wstępnego zmęczenia klepsydryczne próbki zostały poddane symetrycznym obciążeniom cyklicznym o częstotliwości 1 Hz. Analizie poddano zarówno wpływ amplitudy jak i liczby cykli wstępnego zmęczenia na charakterystykę rozciągania. Spadek amplitudy z 957 MPa do 557 MPa przy zachowaniu wartości współczynnika $CFD=0.75$ powodował zmniejszenie wydłużenia przy zerwaniu z 0.61 do 0.04. Ponadto dla amplitud 757 MPa oraz 557 MPa stwierdzono zmianę charakteru pęknięcia próbki z ciągliwego na kruche. Wpływ liczby cykli wstępnego zmęczenia na charakterystykę rozciągania wyznaczono dla amplitudy równej 557 MPa stosując cztery wartości współczynnika CFD, tj. 0; 0,25; 0,50 oraz 0,75. Dla niewielkiej liczby cykli ($CFD=0,25$) wpływ uszkodzeń wywołanych obciążeniem zmęczeniowym na charakterystykę rozciągania był niewielki. Dalsze zwiększanie liczby cykli wstępnego zmęczenia, która odpowiadała współczynnikowi $CFD=0,50$ spowodowało wyraźny spadek wydłużenia do wartości 0,43. Dla maksymalnej wartości $CFD=0,75$ wartość wydłużenia na skutek rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego spadła do 0,04.

Porównanie wyznaczonych w warunkach quasi-statycznych krzywych rozciągania stali AISI 1045 oraz stopu tytanu Ti6Al4V wykazało, że wstępne obciążenia zmęczeniowe mogą mieć wpływ zarówno na zmianę kształtu charakterystyki jak i wartości wydłużenia do zerwania.

Kolejnym etapem realizowanych prac było rozszerzenie analizy wpływu wstępnych obciążeń cyklicznych na krzywe rozciągania o zakres dużych szybkości odkształcania (obciążenia udarowe). W badaniach wykorzystano pręt Hopkinsona przeznaczony do rozciągania próbek SHTB (Split Hopkinson Tensile Bar). Urządzenie zostało zbudowane pod moim nadzorem w ITS z wykorzystaniem doświadczeń zgromadzonych wcześniej przy konstrukcji stanowiska przeznaczonego do ściskania i opisanych w publikacjach [H1-H6]. Podobne stanowisko zostało zbudowane w ramach prowadzonego przeze mnie grantu SONATA w IPPT PAN. Należy podkreślić, że jest to pierwszy dzielony pręt Hopkinsona przeznaczony do rozciągania próbek dostępny w Polsce. Badania zostały przeprowadzone na przykładzie stali dual phase (DP) typu DP 500, która jest szeroko stosowana w przemyśle motoryzacyjnym do konstrukcji nadwozi samochodowych. Poszczególne elementy pojazdu w trakcie eksploatacji są narażone na obciążenia o charakterze zmęczeniowym, które mogą wywołać zmiany mikrostrukturalne w materiale. Zmiany te mogą wpływać na zachowanie konstrukcji samochodu w trakcie zderzenia, podczas którego poszczególne elementy są deformowane plastycznie przy dużych szybkościach odkształcania. W konsekwencji zabezpieczające i energochłonne struktury pojazdu mogą zachowywać się w odmienny sposób niż zostały zaprojektowane i przetestowane w nowym pojeździe dla materiałów w stanie dostawy.

Stal typu DP500 została poddana wstępnym obciążeniom zmęczeniowym, przy dwóch poziomach naprężenia, tj. 400 MPa oraz 500 MPa [H11]. Dla każdej wartości naprężenia

cyklicznego, wstępne obciążenie było zatrzymane dla jednej z dwóch różnych wartości liczby cykli. Następnie próbki były rozciągane w warunkach quasi-statycznych, przy wykorzystaniu maszyny serwo-hydraulicznej oraz dynamicznych przy użyciu pręta Hopkinsona. Przeprowadzona analiza krzywych rozciągania wykazała, że wstępne obciążenia zmęczeniowe powodują wzrost umownej granicy plastyczności. Dla większej liczby cykli wzrost granicy plastyczności był większy. Podobnie, ale tylko w warunkach obciążeń udarowych, wartość wytrzymałości na rozciąganie zwiększała się wyraźnie wraz z liczbą cykli. Natomiast dla obciążeń quasi-statycznych wytrzymałość na rozciąganie pozostawała na stałym poziomie za wyjątkiem przypadku dla wstępnego obciążenia przy liczbie cykli $n=20000$ oraz naprężenia 500 MPa, gdzie można zaobserwować niewielki wzrost jej wartości. Wartość wydłużenia potrzebnego do zerwania próbki oraz odkształcenia odpowiadającego wytrzymałości na rozciąganie maleje ze wzrostem liczby cykli wstępnego obciążenia zmęczeniowego. Ponadto analiza rozkładu odkształcenia na powierzchni próbki przeprowadzono z użyciem cyfrowej korelacji obrazu wykazała, że w warunkach quasi-statycznych zmierzone makroskopowo wydłużenie po zerwaniu ma większą wartość niż w warunkach obciążeń udarowych [H11]. Natomiast odkształcenie wyznaczone lokalnie w pobliżu miejsca zerwania próbki było większe w przypadku próby rozciągania z użyciem pręta Hopkinsona, niż w przypadku rozciągania z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej. Wstępne obciążenia cykliczne nie zmieniają tej zależności.

Rozszerzona analiza z użyciem cyfrowej korelacji obrazu pozwoliła na ocenę wzajemnej relacji pomiędzy lokalnym, a makroskopowym odkształceniem oraz porównanie rozkładu odkształcenia dla próbek o różnej historii obciążeń cyklicznych. Przeprowadzone badania wykazały, że wartości odkształcenia obserwowane makroskopowo jak i lokalnie zależą zarówno od parametrów wstępnego obciążenia jak i szybkości odkształcania [H12].

Zmiany mikrostrukturalne wywołane wstępnym obciążeniem zmęczeniowym są spowodowane cyklicznym umocnieniem zachodzącym w pierwszych cyklach oraz rozwojem uszkodzenia zmęczeniowego obserwowanym w dla większej liczby cykli [H12]. Na podstawie analizy literatury stwierdzono, że przyczyną początkowego umocnienia jest wysoka gęstość dyslokacji oraz ich ograniczona ruchliwość [11]. Natomiast obserwowane dla większej liczby cykli obciążenia wstępne osłabienie materiału jest wywołane rozwojem uszkodzenia zmęczeniowego. Stopień rozwoju tego uszkodzenia może być oceniony na podstawie odkształceń niesprężystych [6, 7]. Przeprowadzone badania wykazały, że istotnie, szybszy wzrost wartości ratchetingu odpowiada większemu osłabieniu materiału, którego efektem jest obniżenie wartości wydłużenia przy zerwaniu oraz zmniejszenie odkształcenia odpowiadającego wytrzymałości na rozciąganie [H10-H12]. Analiza mikrostrukturalna próbek wykazała, że zależnie od historii obciążenia w materiale zaobserwować można uszkodzenia w formie pustek, pęknięć pomiędzy ziarnami ferrytu, pęknięć w obrębie wysp martenzytu oraz pęknięć wzdłuż wysp martenzytu [H12].

Na podstawie przeprowadzonych badań można wnioskować, że dla wybranych materiałów istnieje zależność pomiędzy wstępnymi obciążeniami cyklicznymi, a krzywymi rozciągania materiałów konstrukcyjnych wyznaczonymi dla różnych szybkości odkształcania. Zmianie podlega kształt charakterystyki rozciągania, a co za tym idzie także podstawowe parametry mechaniczne takie jak: umowna granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie, odkształcenie odpowiadające wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenie przy zerwaniu. Wielkość zmian jest skorelowana z wartością odkształceń niesprężystych wyznaczonych w czasie wstępnego obciążenia cyklicznego. Zmiany charakterystyki naprężenie-odkształcenie są zdeterminowane przez dwa mechanizmy: cykliczne umocnienie w początkowych cyklach oraz osłabienie w wyniku rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego.

Podsumowując, mój wkład w rozwój dyscypliny naukowej można przedstawić następująco:

1. Zaprojektowanie i wykonanie stanowisk do badania lepko-plastycznych właściwości materiałów z wykorzystaniem metody pręta Hopkinsona w zakresie obciążeń ściskających i rozciągających. Opracowanie i implementacja metodyki badawczej umożliwiającej wyznaczenie krzywych naprężenie-odkształcenie z wykorzystaniem zbudowanych urządzeń oraz kalibrację wybranych zależności konstytutywnych w szerokim zakresie szybkości odkształcania.
2. Zastosowanie próby przebijania do oceny dokładności równania konstytutywnego opisującego lepko-plastyczne właściwości materiałów konstrukcyjnych.
3. Zastosowanie zminiaturyzowanej metody bezpośredniego uderzenia w próbkę do analizy lepko-plastycznych właściwości polikrystalicznego tantalu w zakresie szybkości odkształcania do $2,2 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ oraz określenie wielkości wpływu poszczególnych zjawisk występujących w tej metodzie na zmierzoną charakterystykę naprężenie-odkształcenie.
4. Rozszerzenie zakresu stosowania modelu konstytutywnego Rusinka-Klapaczko dla szybkości odkształcania do ok. $5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ dla stopów aluminium 6082-T6 oraz 7075-T6.
5. Określenie przyczyny powstawania uszkodzeń osiowych w czasie testu Taylora dla stopu aluminium 6082-T6, z wykorzystaniem analizy trójosiowego stanu naprężenia.
6. Opracowanie i nadzór nad budową pręta Hopkinsona przeznaczonego do badania właściwości mechanicznych materiałów w warunkach obciążeń rozciągających przy dużych szybkościach odkształcania.
7. Wyznaczenie wpływu obciążeń zmęczeniowych na charakterystyki naprężenie-odkształcanie oraz rozkład odkształcenia na powierzchni próbek dla stali AISI 1045 oraz DP500 i stopu tytanu Ti6Al4V w quasi-statycznym i dynamicznym zakresie szybkości odkształcania.
8. Określenie mechanizmów mających wpływ na zmiany charakterystyki rozciągania stali DP 500 poddanej wstępnym obciążeniom zmęczeniowym.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych).

Moja działalność naukowo-badawcza jest związana z Instytutem Transportu Samochodowego, w którym pracuję od 2003 roku. Obszary badań, którymi zajmowałem się w toku swojej kariery naukowej, tj. certyfikacja urządzeń diagnostycznych, homologacja pojazdów i ich wyposażenia, badania w zakresie inżynierii materiałowej i mechaniki, wynikały z kolejnych zmian zachodzących w ostatnich latach w ITS. Jako absolwent specjalności systemy pomiarowo-kontrolne na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych PW początkowo zajmowałem się badaniami wielkości elektrycznych i świetlnych, czego efektem było przygotowanie i obrona rozprawy doktorskiej dotyczącej zastosowania scalonych przetworników obrazu w kolorymetrii. Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych w 2008 roku otrzymałem stanowisko adiunkta w Instytucie Transportu Samochodowego. Równocześnie byłem wykonawcą lub kierownikiem w kilkunastu pracach statutowych finansowanych ze środków wewnętrznych ITS. Ponadto byłem kierownikiem grantu własnego „*Koncepcja lampy sygnałowej z dynamicznie zmienną powierzchnią świetlną*” finansowanego przez MNiSW. Wyniki moich badań w zakresie elektrotechniki były przedmiotem czterech zgłoszeń patentowych i patentów. Z racji wykształcenia zajmowałem się także programowaniem urządzeń pomiarowych, tworzeniem programów do analizy wyników i automatyzacją pomiarów. Jako główny wykonawca projektu finansowanego przez MNiSW dotyczącego matrycowego miernika luminancji opracowałem oprogramowanie do analizy obrazu, które umożliwiło zastosowanie scalonych przetworników obrazu do analizy luminancji oraz barwy.

Wykorzystując swoją wiedzę w zakresie systemów pomiarowych, jeszcze jako pracownik Zakładu Oświetlenia i Wyposażenia Elektrycznego Pojazdów ITS, podjąłem współpracę z Centrum Badań Materiałowych (CBM) ITS. Przedmiotem pierwszych realizowanych przeze mnie badań z dziedziny mechaniki, było opracowanie oprogramowania, w którym zaimplementowałem nowatorską, zmodyfikowaną próbę niskocyklowego zmęczenia na maszynę wytrzymałościową Instron. Następnie, po przeniesieniu do CBM, powierzono mi funkcję Kierownika Pracowni Mechatroniki. Obszar mojej działalności rozszerzył się o badania w zakresie mechaniki, ze szczególnym uwzględnieniem analizy zachowania materiałów w warunkach deformacji zachodzącej przy dużych szybkościach odkształcania. Charakter prac badawczych prowadzonych przez mój zespół był interdyscyplinarny i obejmował przede wszystkim zagadnienia związane z elektrotechniką, mechaniką i badaniami środowiskowymi. Potwierdzeniem tego faktu było przyznanie i realizacja pod moim kierownictwem projektu rozwojowego finansowanego przez NCBiR pt. „*Opracowanie i badania opartej na bateriach słonecznych stacji ładowania akumulatorów do pojazdów elektrycznych*”. Projekt składał się z części obejmującej badania w zakresie elektrotechniki jak i mechaniki. Wynikiem projektu, oprócz demonstratora technologii było zgłoszenie patentowe dotyczące nowatorskiej konstrukcji zasobnika na akumulatory trakcyjne, który umożliwia szybką wymianę baterii na naładowane w specjalnie zaprojektowanej stacji ładowania.

Pracując w CBM systematycznie pogłębiałem swoją wiedzę z zakresu mechaniki biorąc udział w konferencjach, seminariach oraz publikując otrzymane wyniki badań. Duża liczba grantów i prac statutowych z zakresu mechaniki realizowanych w CBM sprawiła, że w większym stopniu zacząłem interesować się nie tylko zagadnieniami związanymi z aparaturą pomiarową w obszarze mechaniki, ale także mechaniką ciała stałego. Wyniki prowadzonych badań były prezentowane na wielu konferencjach krajowych i międzynarodowych m.in. *"European KONES"*, *"International Conference on Experimental Mechanics"*, *"Solid Mechanics Conference"*, *"International Symposium on Impact Engineering"*. Mój udział w realizowanych przez CBM grantach często dotyczył zagadnień związanych z badaniami materiałów w warunkach deformacji zachodzących przy dużych szybkościach odkształcania np. *"Pasywna ochrona obiektów mobilnych (powietrznych i lądowych) przed oddziaływaniem pocisków AP"*, *"Opracowanie i badanie innowacyjnych materiałów nowej generacji na lekkie, modułowe osłony balistyczne o wspomagającym działaniu ochronnym"*, *"Podwyższenie odporności na wybuch miny lub improwizowanego ładunku wybuchowego dna pojazdu bankowozu"*. Prowadzone przeze mnie prace naukowe dotyczyły przede wszystkim eksperymentów przy dużych szybkościach odkształcania, modelowania konstytutywnego i symulacji MES zjawisk zachodzących w warunkach obciążeń udarowych.

Rozwijając swoje zainteresowania w dziedzinie mechaniki oraz podnosząc kompetencje, równoległe do pracy w ITS, podjąłem współpracę z Instytutem Podstawowych Problemów Techniki PAN (IPPT PAN). Od kwietnia 2011 do kwietnia 2014 byłem w tej jednostce zatrudniony na stanowisku adiunkta w Zakładzie Wytrzymałości Materiałów. Przedmiotem prowadzonych prac naukowych były badania właściwości mechanicznych materiałów przy dużych szybkościach odkształcania oraz modelowanie materiałów i konstrukcji z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Otrzymane wyniki zostały zaprezentowane na międzynarodowych konferencjach. Jednym z kierunków badań prowadzonych w IPPT, przy współpracy z prof. Zbigniewem L. Kowalewskim było zastosowanie zminiaturyzowanej metody bezpośredniego uderzenia w próbkę do analizy lepko-plastycznych właściwości materiałów w zakresie bardzo dużych szybkości odkształcania. Rezultaty otrzymane z wykorzystaniem wspomnianej metody zainteresowały uznanych międzynarodowych specjalistów w dziedzinie badań dynamicznych. Efektem nawiązanej współpracy jest publikacja, która ukazała się w 2012 roku w czasopiśmie *Strain*, której współautorami są: W. Moćko, J.A. Rodrigues-Martinez (Madryt, Hiszpania), Z.L. Kowalewski (IPPT PAN, Warszawa) oraz A. Rusinek (Metz, Francja). Oprócz prac w zakresie opracowania metodyki badań, umożliwiającej analizę zachowania materiałów w warunkach dużych szybkości odkształcania, prowadziłem także badania nad zależnościami konstytutywnymi oraz analizy MES. Wyniki moich prac były regularnie prezentowane w ramach otwartego seminarium Zakładu Wytrzymałości Materiałów IPPT PAN. Podsumowaniem mojej pracy naukowej w IPPT PAN było przyznanie w 2014 roku nagrody za znaczący dorobek publikacyjny.

W IPPT PAN prowadziłem wykłady dla studium doktoranckiego dotyczące badań dynamicznych pt. „Zastosowanie metody pręta Hopkinsona do badania właściwości mechanicznych materiałów przy dużych prędkościach odkształcania”. Zajęcia dydaktyczne składały się z części praktycznej oraz teoretycznej.

W toku swojej dotychczasowej kariery naukowej opublikowałem łącznie 136 prac (w tym 110 po doktoracie), z czego 13 w czasopismach posiadających IF (lista A MNiSW), 38 w recenzowanych czasopismach, 30 w materiałach konferencyjnych i 55 w formie prezentacji konferencyjnej. Podsumowaniem mojej dotychczasowej pracy naukowej w dziedzinie mechaniki jest monotematyczny cykl publikacji, który stanowi przedmiot niniejszego wniosku.

Dotychczas byłem kierownikiem ponad stu prac wykonywanych na zlecenie przemysłu. Badania obejmowały różne elementy wyposażenia pojazdów, jak i infrastruktury drogowej takie, jak: tablice rejestracyjne, kamizelki odblaskowe, lampy, nalepki kontrolne, szyby samochodowe, elementy lakierowane itp. Prace były wykonywane w ramach akredytowanego przez Polskie Centrum Akredytacji laboratorium badawczego. W CBM jestem jedną z osób upoważnionych do autoryzacji sprawozdań. Ponadto przeszedłem cykl szkoleń oceny audytowania laboratoriów badawczych w zakresie normy PN-EN ISO/IEC 17025 i uzyskałem uprawnienia audytora i eksperta technicznego. Swoją wiedzę wykorzystuję w ramach audytów wewnętrznych prowadzonych w ITS.

Jednym z efektów mojej działalności w obszarze badań dynamicznych było wyposażenie pracowni, w zbudowane pod moim nadzorem, stanowisko badawcze realizujące technikę dzielonego pręta Hopkinsona umożliwiające badania materiałów w warunkach obciążeń ściskających. Stanowisko zostało zbudowane w ramach jednego z prowadzonych w ITS projektów. Byłem współautorem rozwiązań konstrukcyjnych, a także projektantem i wykonawcą układu pomiarowego oraz oprogramowania do analizy wyników otrzymanych za pomocą pręta Hopkinsona. Stworzona w środowisku LabView aplikacja umożliwia korekcję wpływu adiabatycznego nagrzewania, tarcia, bezwładności oraz dyspersji fali sprężystej na wyznaczone krzywe ściskania. Wyniki otrzymane z wykorzystaniem zbudowanego stanowiska były publikowane i prezentowane na wielu konferencjach i seminariach. W czasie prowadzenia badań naukowych z wykorzystaniem zbudowanego pręta Hopkinsona okazało się, że niezbędnym uzupełnieniem pręta Hopkinsona umożliwiającego badania w warunkach obciążeń ściskających jest pręt przeznaczony do rozciągania próbek. Stanowisko takie, również na podstawie mojej koncepcji, zostało zaprojektowane i zbudowane w ITS. Obydwa urządzenia mają możliwość współpracy z komorą grzewczą, dzięki czemu możliwa jest analiza wpływu temperatury na naprężenie plastycznego płynięcia. Po uzupełnieniu wyposażenia w szybką kamerę Phantom V1210 oraz środowisko obliczeniowe ABAQUS powstał kompletny system do analizy właściwości mechanicznych materiałów w zakresie dużych szybkości odkształcania. Efekty prac zrealizowanych z wykorzystaniem zbudowanych urządzeń posłużyły mi do przygotowania monotematycznego cyklu publikacji.

Jak wspominałem, pracując w CBM szczególną uwagę zwróciłem na badania zachowania materiałów w warunkach obciążeń udarowych (przy dużych szybkościach odkształcania). Tematyka ta jest niezwykle aktualna z punktu widzenia transportu samochodowego, ponieważ dotyczy bezpośrednio spraw związanych z bezpieczeństwem pasażerów pojazdów w trakcie zderzenia. Należy jednak wspomnieć, że obciążenia o podobnym charakterze występują także w przemyśle lotniczym, zbrojeniowym, budownictwie czy energetyce. Mimo, że wpływ szybkości odkształcania na wartość granicy plastyczności stwierdzono już na początku ubiegłego wieku (badania Hopkinsona i Taylora), to jednak do chwili obecnej tego typu badania są bardzo intensywnie prowadzone. Celem tych badań jest wyznaczenie właściwości mechanicznych nowych materiałów wprowadzanych do produkcji. Na podstawie otrzymanych charakterystyk można wyznaczyć zależności konstytutywne wykorzystywane później do modelowania MES konstrukcji, która jest obecnie standardowym etapem tworzenia nowych produktów. Kolejnym powodem dla którego prowadzi się badania dynamiczne, są badania podstawowe dotyczące zjawisk zachodzących w trakcie deformacji przy dużych szybkościach odkształcania. Pracownicy naukowcy oraz przedstawiciele przemysłu z całego świata zajmujący się tematyką obciążeń udarowych są zrzeszeni w organizacji DYMAT, której jestem członkiem. W ubiegłym roku byłem współorganizatorem konferencji LWAG 2014 organizowanej przez DYMAT w Polsce.

W ramach działalności dydaktycznej opiekowałem się czterema studentami w trakcie praktyk w ITS. Tematy prac realizowanych przez studentów dotyczyły aktualnie realizowanych w CBM grantów i prac statutowych. Praktykanci mieli możliwość zapoznania się z urządzeniami badawczymi dostępnymi w ITS, a także wykonywali prace przewidziane do realizacji w ramach projektów. W roku 2010 byłem członkiem Komisji ds. Oceny Badań Naukowych i Prac Rozwojowych wykonywanych w Instytucie Transportu Samochodowego, która dokonywała oceny wniosków, przyznawała finansowanie oraz odbierała prace statutowe realizowane w ITS.

Szczegółowy wykaz osiągnięć naukowo-badawczych został przedstawiony w Załączniku 3.

6. Wykaz literatury powołanej w autoreferacie

6.1. Prace wchodzące w zakres monotematycznego cyklu publikacji habilitanta

[H1] W. Moćko, Z. L. Kowalewski, Dynamic Compression Tests – Current Achievements and Future Development, *Engineering Transactions* 59, 2011, 1-14

[H2] W. Moćko, Z.L. Kowalewski, Application of FEM in assessments of phenomena associated with dynamic investigations on miniaturized DICT testing stand., *Kovove Materialy* 51, 2013 71–82

[H3] W. Moćko, Analysis of the impact of the frequency range of the tensometer bridge on the results of the measurement by the Split Hopkinson Pressure Bar. *Metrology and Measurement Systems* 20, 2013, 555–564.

[H4] W. Moćko, Z.L. Kowalewski, Perforation test as an accuracy evaluation tool for a constitutive model of austenitic steel. *Archives of Metallurgy and Materials* 58, 2013, 1105-1110.

[H5] W. Moćko, Comparison of energy absorption properties of high nitrogen austenitic steel and cast alloy determined using low velocity perforation test, *Archives of Metallurgy and Materials* 59, 2014, 65-69.

[H6] W. Moćko, J. A. Rodríguez-Martínez, Z. L. Kowalewski, A. Rusinek, Compressive viscoplastic response of 6082-T6 and 7075-T6 aluminium alloys under wide range of strain rate at room temperature: Experiments and modelling , *Strain* 48, 2012, 498-509.

[H7] W. Moćko, J. Janiszewski, M. Grązka. Application of an extended Rusinek-Klepaczko constitutive model to predict the mechanical behavior of 6082-T6 aluminum under Taylor impact test conditions, *Journal of Strain Analysis of Engineering Design* 48, 2013, 364–375.

[H8] W. Moćko, J. Janiszewski, M. Grązka, J. Radziejewska. Comparison of impact loading conditions during symmetric and non-symmetric Taylor test of 6082-T6 aluminium alloy , *International Journal of Impact Engineering*, 2014, DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.08.015

[H9] W. Moćko, The influence of stress-controlled tensile fatigue loading on the stress-strain characteristics of AISI 1045 steel, *Materials and Design* 58, 2014, 145–153.

[H10] W. Moćko, Z.L. Kowalewski, Evolution of the tensile properties of the TiAl6V4 alloy due to the prior cyclic loading history, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 52, 2014, 847-851.

[H11] W. Moćko, A. Brodecki, L. Kruszka, Mechanical response of dual phase steel at quasi-static and dynamic tensile loadings after initial fatigue loading, *Mechanics of Materials*, DOI: 10.1016/j.mechmat.2015.07.015

[H12] W. Moćko, A. Brodecki, J. Radziejewska, Effects of pre-fatigue on the strain localization during tensile tests of DP 500 steel at low and high strain rates, *Journal of Strain Analysis of Engineering Design*, DOI: 10.1177/0309324715599132

6.2. Pozostałe prace

- [1] B. Hopkinson, „A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets,” *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* 213, 1914, 437-456,
- [2] H. Kolsky, „An Investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of deformation of loading,” *Proc Phys Soc*, nr 62B, 1949, 647.
- [3] T.Jankowiak, Rusinek A., Łodygowski T., Validation of the Klepaczko–Malinowski model for friction correction and recommendations on Split Hopkinson Pressure Bar. *Finite Elem. Anal. Des.* 47, 2011, 1191–1208.
- [4] J.Z. Malinowski, J.R. Klepaczko, Z.L. Kowalewski, Miniaturized compression test at very high strain rates by direct impact, *Experimental Mechanics*, 47, 2007, 451-463.
- [5] Taylor G. I. The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress I. Theoretical considerations. *Proc Roy Soc London Series A* 194, 194, 189-299.
- [6] Socha G., Experimental investigations of fatigue cracks nucleation, growth and coalescence in structural steel, *International Journal of Fatigue*, 25, 2003, 139–147.
- [7] Socha G., Prediction of the fatigue life on the basis of damage progress rate curves, *International Journal of Fatigue*, 26, 2004, 339–47.
- [8] Froustey C., Lataillade J.L., 2009, Influence of the microstructure of aluminium alloys on their residual impact properties after a fatigue loading program. *Mat. Sci. Eng. A-Struct.* 500, 155–163.
- [9] Galán López J., Verleysen P., De Baere I., Degrieck J., 2011, Tensile properties of thin sheet metals after cyclic damage. *Procedia Eng.* 10, 1961–1966.
- [10] Itabashi M., Koseki H., 2013, Mechanical Characterization of Pre-Fatigued Free-Cutting Steels under Dynamic Tension. *Engineering Transactions* 61, 87-98.
- [11] Hu ZG, Zhu P, Meng J. Fatigue properties of transformation-induced plasticity and dual-phase steels for auto-body lightweight: Experiment, modeling and application. *Mater Design* 2010; 31:2884–2890.



