

AUTOREFERAT

1. Imię i Nazwisko

Volodymyr Hutsaylyuk

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

- Certyfikat docenta; docent dr inż. w Katedrze Materiałoznawstwa; Ministerstwo Edukacji I Nauki Ukrainy, Kolegium Kwalifikacyjny, Kijów, 2005;
- Dyplom doktora; dr inż., dyscyplina „Mechanika pękania” specjalność „Mechanika deformowanego ciała stałego”; tytuł pracy doktorskiej: „Wpływ wstępnego obciążenia cyklicznego na odporność na kruche pękanie stali żarowytrzymałej”; Prezydium Wyższej Komisji Kwalifikacyjnej Ukrainy, Kijów, 2002;
- Dyplom specjalisty; inżynier w specjalności „Systemy i obrabiarki dla obróbki skrawaniem metali”; tytuł pracy dyplomowej: „Zwiększenie wydajności obrabiarek wiertniczych i wytaczarek za pomocą modernizacji mechanizmów ochronnych”; Wydział Mechaniczno-Technologiczny, Tarnopolski Instytut Budowy Aparatury Technicznej Ternopil, 1995.

1. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych oraz w jednostkach przemysłowych i in.

- **01.10.2007 — obecnie** – adiunkt naukowo-dydaktyczny z pełnieniem funkcji kierownika Zakładu Podstaw Konstrukcji Maszyn (01.09.2014-01.10.2016) Instytutu Budowy Maszyn, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna;
- **01.10.2006 — 01.10.2007** – starszy specjalista, Katedra Budowy Maszyn, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna;
- **19.11.2003 — 30.09.2006** – docent, Katedra Materiałoznawstwa, Wydział Mechaniczno-Technologiczny, Tarnopolski Państwowy Uniwersytet Techniczny im. Iwana Puluja;
- **25.02.2002 — 19.11.2003** – starszy wykładowca, Katedra Materiałoznawstwa, Wydział Mechaniczno-Technologiczny, Tarnopolski Państwowy Uniwersytet Techniczny im. Iwana Puluja;
- **01.09.2001 — 25.02.2002** – asystent, Katedra Materiałoznawstwa, Wydział Mechaniczno-Technologiczny, Tarnopolski Państwowy Uniwersytet Techniczny im. Iwana Puluja;
- **08.11.1998 — 03.09.2001** – kierownik samodzielnego związku zawodowego studentów, Tarnopolski Państwowy Uniwersytet Techniczny im. Iwana Puluja;
- **11.07.1995 — 04.11.1995** – inżynier specjalista do spraw zaopatrzenia, przedsiębiorstwo samochodowe w Podwołoczysku;

2. Dziedzina naukowa, dyscyplina naukowa, specjalność naukowa reprezentowana po uzyskaniu stopnia doktora.
Dziedzina naukowa: nauki techniczne
Dyscyplina naukowa: „Mechanika”;
Specjalność naukowa: „Mechanika deformowanego ciała stałego”.
3. Dziedzina naukowa, dyscyplina naukowa, specjalność naukowa wnioskowana w postępowaniu habilitacyjnym.
Dziedzina naukowa: *nauk technicznych*
Dyscyplina naukowa: *Mechanika*
4. Wskazanie osiągnięcia¹ 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

„Analiza wpływu wstępnego obciążenia kombinowanego na zachowania właściwości mechanicznych wybranych stopów aluminium w warunkach obciążenia zmiennego”

1. (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy),
 - A1. M. Chausov, A. Pylypenko, V. Berezin, **V. Hutsaylyuk**, L. Sniezek, J. Torzewski, Property of the Monotonic Deformation of Aluminum Alloy 2024-T3 under Conditions of Complex Loading, 2014, Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems, ITELMS 2014 - Proceedings of the 9th International Conference 2014, Pages 57-63 9th International Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems, ITELMS 2014; Kaunas University of Technology Panevezys Institute Klaipedos str. 3, Panevezys; Lithuania; 22 May 2014 through 23 May.
 - A2. Zasimchuk E. E, Gontareva R. G, Baskova O. I, Chausov M. G, **Hutsaylyuk V.**, On Possibility to Use Single Crystal Sensors of Deformation Damage under Dynamical Loading. 2012, Metallofizika i Noveishie Tekhnologii, Vol. 34, Iss. 4, pp. 509-520.
 - A3. Chausov M. G., Berezin, V. B., Pylypenko A. P., **Hutsaylyuk V. B.**, 2015, Strain field evolution on the surface of aluminum sheet alloys exposed to specific impact with oscillation loading, Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol. 50, Iss. 1, pp. 61-72.
 - A4. Zasimchuk E, Markashova L., Baskova O., Turchak T., Chausov N., **Hutsaylyuk V.**, Berezin V., Influence of Combined Loading on Microstructure and Properties of Aluminum Alloy 2024-T3, Journal of Materials Engineering And Performance, 2013, Vol. 22, Iss. 11, pp. 3421-3429.
 - A5. Zasimchuk E., Turchak T., Baskova A., Chausov N., **Hutsaylyuk V.**, 2017, Structural Transformations in Metallic Materials During Plastic Deformation, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 26, Iss. 3, pp.1293-1299.

¹ w przypadku, gdy osiągnięciem jest praca/ prace wspólne, należy przedstawić oświadczenia wszystkich jej współautorów, określające indywidualny wkład każdego z nich w jej powstanie

- A6. **V. Hutsaylyuk**, L. Snieżek, J. Torzewski, M. Chausov, V. Berezin, A. Pylypenko, 2015, Influence of Preliminary Combined Loading on Low Cyclic Fatigue Deformation of Aluminum Alloy D16ChATV, *Procedia Engineering*, Vol. 114, pp. 18-25.
- A7. **V. Hutsaylyuk**, L. Snieżek, M. Chausov, J. Torzewski, A. Pylypenko, M. Wachowski, 2016, Cyclic deformation of aluminium alloys after the preliminary combined loading, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 69, pp. 66-76.
- A8. **Hutsaylyuk. V.**, The peculiarity of cyclic elastic-plastic deformation of aluminum alloys D16CHATV under the conditions of the previous combined load, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, DOI:10.1080/15376494.2018.1506839.
- A9. Sulym H., **Hutsaylyuk V.**, Pasternak Ia., Turchyn I., Stress-strain state of an elastic rectangular plate under dynamic load, 2013, *Mechanika*, Iss. 6, pp. 620-626.
- A10. **Hutsaylyuk V.**, Chausov M., Berezin V., Pylypenko A., Strength analysis of mechanical systems at dynamic non-equilibrium processes, *ENGINEERING FAILURE ANALYSIS*, 2013, Vol. 35, pp. 636-644.

- 2. Omówienie celu naukowego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników stanowiących znaczny wkład habilitanta w rozwój określonej dyscypliny naukowej, wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Obecny rozwój techniki przyczynił się do tego, że w nowoczesnych konstrukcjach inżynierskich na szeroką skalę stosowane są materiały heterogeniczne, struktura których w pewnym stopniu jest niejednorodna. Stosowanie różnego rodzaju obróbek technologicznych skutkuje tym, że materiały heterogeniczne wyczerpują swój zapas plastyczności. Kolejna obróbka technologiczna takiego materiału, mająca na celu poprawę jego plastyczności, wymaga, jednakże uwzględnienia wpływu zmian zachodzących na różnych poziomach jego struktury. Zatem ustalenie zależności pomiędzy zmianami strukturalnymi materiału, a jego właściwościami plastycznymi i wytrzymałościowymi jest wciąż aktualnym problemem naukowym.

Modele zachowania materiałów heterogenicznych muszą adekwatnie odzwierciedlać wzajemne oddziaływania składowych struktury opierając się na znanych zasadach fizycznych budowy ciał stałych oraz procesach zachodzących w nich w warunkach odkształcenia [1-4].

Duża ilość różnego rodzaju defektów struktury, zjawiska spowodowane ich wzajemnym oddziaływaniem, obecność różnych faz i wtrąceń oraz różnorodność ich formy przesądza o stosowaniu podejścia statystycznego do opisu procesów odkształcenia oraz niszczenia materiałów konstrukcyjnych. W związku z tym kluczowe staje się traktowanie odkształconego ciała stałego jako niezrównoważonego otwartego systemu. W tym systemie powstają stabilne dyssypatywne struktury odkształceniowe w trakcie oddziaływania czynników zewnętrznych i po osiągnięciu przez nie wartości granicznych. Badania doświadczalne tych procesów są współcześnie stosunkowo złożone i pracochłonne. Niestety ich wyniki wciąż jeszcze nie pozwalają na uzyskanie jednoznacznych odpowiedzi na cały szereg pytań,

powstających w trakcie analizy procesu formowania się dyssypatywnych struktur odkształceniowych. W przedmiotowej literaturze [4-16] można stwierdzić brak wyczerpujących informacji dotyczących współoddziaływania różnych poziomów strukturalnych materiału polikrystalicznego. Modele fizyczne wykorzystywane do badania współdziałania osobnych atomów i defektów traktują sieć krystaliczną jako izotropowe kontinuum, nie uwzględniając koncentracji naprężenia powstającego w wyniku wzajemnego oddziaływania ziaren anizotropowych. Z kolei w mechanice strukturalnie niejednorodnego środowiska analizuje się właściwości polikryształu uwzględniając cechy poszczególnych elementów struktury. Niestety większość takich modeli ogranicza się jedynie do poziomu ziarna.

We współczesnych rozważaniach naukowych dotyczących zjawisk towarzyszących procesom odkształceniowym przeważa pogląd uwzględniający zmianę właściwości polikryształu na poziomie mezoskopowym. Pogląd ten jest syntezą dwóch podejść: „od mikro do makro” oraz „od makro do mikro” [7, 10, 11, 17].

W podejściu „od mikro do makro” w pierwszej kolejności są analizowane właściwości monokryształów, a następnie wykonuje się badania statystycznych zależności rozkładu składowych mikronaprężeń i przeprowadza się analizy procesów rozwoju poślizgu i uszkodzenia. W końcowym etapie, na podstawie przeprowadzonej analizy, określa się podstawowe zależności determinujące kryteria plastyczności i wytrzymałości.

Drugie podejście tzw. „od makro do mikro” jest stosowane do definiowania wrażliwych stałych strukturalnych, występujących w statystycznych kryteriach plastyczności i wytrzymałości, które nie mogą być wyznaczone z istniejących modeli konstytutywnych.

Synteza wymienionych podejść stała się możliwa dzięki powstaniu w latach 80-tych ubiegłego wieku teorii plastyczności uwzględniającej strukturalne poziomy odkształcenia ciał stałych. Doprowadziło to do powstania mezomechaniki, która z fizycznego punktu widzenia jest niczym innym jak mechaniką, która integralnie uwzględnia zmiany strukturalne w skali od mikro do makro na wszystkich poziomach badanego materiału.

Mezomechanika rozpatruje także materiał polikrystaliczny jako system niezerównoważony oparty na strukturach dyssypatywnych [4-7, 9-16]. Określenie „struktura dyssypatywna” z kolei jest kluczowe w badaniach synergetycznych, skierowanych na poznanie mechanizmów samoorganizacji, rozwoju, stabilności oraz rozpadu struktur o różnej naturze. Zatem w deformowanym ciele stałym, zwłaszcza w stanie zaburzonej równowagi relatywnej materiałów polikrystalicznych, prezentowana jest cała hierarchia struktur odkształceniowo dyssypatywnych na różnych poziomach strukturalnych.

Samoorganizacja struktury w takich systemach synergetycznych dokonywana jest zgodnie z zasadą zachowania entropii, według której, jeżeli dopuszczalne jest wiele stanów układu spełniających zasadę zachowania energii, to promowany jest stan, w którym rozpraszanie (strata) energii poza dany system jest minimalne. Skutkiem tego jest powstawanie struktur dyssypatywnych, które są zdolne do dużej absorpcji energii zewnętrznej. Struktury te cechują się dużą trwałością w czasie (metamorficznością), tj. prawie nie ulegają procesom relaksacyjnym po zaprzestaniu oddziaływania zewnętrznego.

Relaksacja naprężenia jest dokonywana na różnych poziomach strukturalnych, tj. od poziomu atomowego do makroskopowego. Obejmuje ona każdy poziom strukturalny i zachodzi do momentu, gdy nastąpi wyczerpanie zdolności danego poziomu struktury do jej

relaksacji. Dlatego w dziedzinie fizyki ciała stałego typowe podejście do procesów akumulowania uszkodzenia plastycznego w trakcie niszczenia wymaga uwzględnienia wzajemnego oddziaływania zarówno na odpowiednim poziomie strukturalnym, jak i między poziomami. Takie podejście gwarantuje poprawną ocenę właściwości mechanicznych materiałów i wyrobów oraz pozwala bezpośrednio na opis makroskopowych właściwości materiałów na wszystkich etapach przebiegu procesu odkształcenia [18-34].

Badanie fundamentalnych zasad zachowania się materiałów w trakcie dynamicznego obciążenia jest ważne ze względu na zasadniczy problem mechaniki odkształcenia ciała stałego, a mianowicie sformułowania ogólnej teorii opisującej przebieg deformacji materiałów w warunkach odkształcenia zachodzącego z dużymi szybkościami odkształcenia. Zgodnie z zasadą fizyki ciała stałego wytrzymałość i plastyczność są strukturalnie wrażliwymi parametrami metali rzeczywistych i zależą zarówno od układu przestrzennego, jak i defektów siatki krystalicznej. Z kolei rozwój teorii defektów struktury ujawnił, że mikromechanizmy odpowiadające za plastyczne płynięcie oraz niszczenie materiałów są również bardzo wrażliwe, na charakter (rodzaj) obciążenia. Wskutek tego dalszy postęp w teorii mechaniki ciała stałego staje się niemożliwy bez uwzględnienia wzajemnych powiązań pomiędzy mikro i makro parametrami struktury materiału w trakcie jego impulsowego obciążenia. Obecnie najmniej zbadany jest zakres prędkości odkształcenia $10^5 \div 10^6 \text{ s}^{-1}$, który w teorii balistyki końcowej odpowiada zakresowi prędkości uderzenia pocisku od 2,5 do 3,5 km/s. W tym zakresie prędkości odkształcenia zmienia się charakter krzywej umocnienia materiału, wyrażające się przede wszystkim wzrostem granicy plastyczności. Mikrosekundowe obciążenie materiału powoduje niestabilne płynięcie plastyczne oraz występowanie rotacyjnych stanów odkształcenia plastycznego. Wymaga to opracowania nowych teorii oraz metodyk badań doświadczalnych ukierunkowanych głównie na badania mechanicznej reakcji rzeczywistych materiałów na różnych poziomach strukturalnych, zwłaszcza na poziomie mezoskopowym. Dlatego badania wpływu wstępnego obciążenia kombinowanego¹ na właściwości mechaniczne materiałów konstrukcyjnych oraz opracowywanie modeli materiałowych opisujących zachowanie mechaniczne w warunkach dynamicznych procesów niezerównoważonych jest wciąż zagadnieniem aktualnym.

Przedstawiony problem badawczy szczególnie aktualny jest dla takich materiałów, jak stopy aluminium 2024-T351 oraz D16CzATW, które na dużą skalę są stosowane w przemyśle lotniczym. Stopy te w trakcie eksploatacji są poddawane obciążeniom złożonym i są narażone na oddziaływania dodatkowych impulsów obciążenia w czasie obciążenia zasadniczego. Skutkuje to przede wszystkim zmianami struktury materiału, a w konsekwencji zmianami właściwości mechanicznych stopów. Zjawisko to zainspirowało habilitanta do wszczęcia badań dotyczących wpływu wstępnego obciążenia kombinowanego na zmianę właściwości mechanicznych wybranych stopów aluminium.

Celem nadrzędnym podjętych prac było zbadanie wpływu wstępnego obciążenia kombinowanego na reakcję mechaniczną stopów aluminium w warunkach niezerównoważonych, dynamicznych zmian zachodzących w strukturze materiałów.

¹ Pod pojęciem „obciążenie kombinowane” rozumie się sumaryczne oddziaływanie zasadniczego, rozciągającego obciążenia monotonicznego, na które nakłada się dodatkowo krótkotrwały impuls siły, zgodny z kierunkiem działania obciążenia zasadniczego.

Tak sformułowany cel wymagał realizacji szeregu zadań:

- analizy stanu zagadnienia dotyczącego odkształcenia materiałów heterogenicznych z punktu widzenia zasad mezomechaniki fizycznej (podejście synergetyczne);
- analizy literaturowej kluczowych zagadnień teorii mikromechaniki dynamicznego odkształcenia materiałów strukturalnie niejednorodnych;
- opracowania metodyki badania właściwości mechanicznych stopów aluminium 2024-T351 i D16CzATW w warunkach wstępnego obciążenia kombinowanego;
- ujawnienia i opisanie zjawisk fizycznych odpowiadających za zachowania mechaniczne stopów aluminium w warunkach wstępnego obciążenia kombinowanego;
- badania mechanizmów wywołujących zmiany strukturalne w materiałach heterogenicznych w warunkach wstępnego obciążenia kombinowanego;
- wyznaczenia parametrów określających właściwości mechanicznych stopów aluminium 2024-T351 i D16CzATW w warunkach obciążenia zmiennego po wstępnym obciążeniu kombinowanym;
- analizy teoretycznej przejściowych procesów falowych przy obciążeniu kombinowanym materiałów heterogenicznych z wykorzystaniem równań analitycznych mechaniki ciała stałego oraz modelowania numerycznego;
- opracowania modelu deterministycznego zachowania się materiałów w warunkach dynamicznych procesów nieźrównoważonych.

W przedstawionym do recenzji cyklu publikacji monograficznych zestawiono szereg wyników badań doświadczalnych i analitycznych dotyczących wpływu wstępnego obciążenia kombinowanego na właściwości mechaniczne stopów aluminium w warunkach obciążenia zmiennego. Ze względu na ograniczenia publikacyjne w czasopiśmie naukowym analizę stanu zagadnienia bardzo szeroko podjęto w pracy autorskiej [35]. Skupiono się w niej na tematyce mechanizmów rządzących odkształceniem plastycznym materiałów heterogenicznych. Bazując na zasadach synergetycznej mezomechaniki fizycznej rozpatrzono przebieg mechanizmów deformowania materiałów strukturalnie niejednorodnych. Przywołane zostały tam podstawowe zasady strukturalnej wielopoziomowej teorii wytrzymałości i plastyczności, a także informacje dotyczące problematyki propagacji fal odkształceniowych w ciele stałym. Jednocześnie przeanalizowano wpływ propagacji fal na reakcję mechaniczną materiałów strukturalnie niejednorodnych w warunkach obciążenia dynamicznego. Ponadto, omówione zostało zjawisko dyssypacji energii mechanicznej w materiałach poddanych obciążeniom monotonicznym i zmiennym z uwzględnieniem mikromechaniki odkształcenia dynamicznego materiałów strukturalnie niejednorodnych.

Liczne prace naukowe pojedynczych badaczy oraz całych szkół naukowych pokazują, że deformowany materiał polikrystaliczny (heterogeniczny) w ogólnym przypadku przedstawia się, jako wielopoziomowy, dyssypatywny system dynamiczny, posiadający zarówno kinetykę translacyjno–rotacyjną, jak również i falową naturę odkształcenia. [9-16, 35] W wyżej wymienionych publikacjach szeroko stosowano metody analityczne do obliczenia wytrzymałości materiałów z uwzględnieniem hierarchii poziomów strukturalnego odkształcenia oraz wielkości deformacji plastycznej w strukturze uszkodzonej.

Takie podejście pozwala na opisanie procesów powstania struktur mezoskopowych materiału heterogenicznego w warunkach obciążenia dynamicznego w następujących przypadkach [35]:

- a) dla materiału niewrażliwego na prędkość deformowania (reakcje dynamiczne opisywane za pomocą teorii Karmana-Taylora-Rachmatulina);
- b) dla materiału wrażliwego na prędkość deformacji (reakcje dynamiczne opisywane za pomocą teorii Sokolowskiego-Malverna).

Niemniej niezależnie od wrażliwości materiału na prędkość deformowania wstępne odkształcenie plastyczne znacząco jakościowo zmienia charakter procesu dyssypowania energii w materiale. Dla materiałów polikrystalicznych z dużym rozmiarem ziaren energia dyssypacji jest większa w porównaniu z materiałami drobnoziarnistymi. Proces rozdrobnienia struktury krystalicznej ma istotny wpływ zarówno na ilościowe, jak i - w przypadku rozdrobnienia do poziomu nanokrystalicznego - jakościowe cechy procesu dyssypowania energii w materiale.

Proces dyssypowania energii dla większości materiałów jest zazwyczaj zależny od prędkości odkształcenia. Jednakże, istnieje grupa materiałów, które nie wykazują wpływu prędkości odkształcenia na zdolność do dyssypowania energii. Przykładem takiego materiału może być stop aluminium serii 2024.

Analiza literaturowa wyników badań doświadczalnych ujawnia duże rozbieżności we właściwościach mechanicznych materiałów badanych w warunkach dynamicznych. Na przykład, wartości naprężenia plastycznego płynięcia podawane w niektórych publikacjach różnią się nawet o kilkaset procent [36, 37]. Badania doświadczalne i teoretyczne wykazują, że procesy towarzyszące odkształceniu plastycznemu oraz zniszczeniu przy prędkościach deformacji $\dot{\epsilon} > 10^3 \text{ s}^{-1}$ znacząco zależą od właściwości zespołowych nośników elementarnych deformacji plastycznych² na różnych poziomach strukturalnych.

We współczesnej literaturze [10-17] tylko nieliczne modele i metodyki badań materiałów adekwatne uwzględniają osobliwości deformacji mikrostrukturalnej przy dużych prędkościach odkształcenia.

W pracy (A1) wchodzącej w skład cyklu publikacji monograficznych przedstawiono nowo opracowaną metodykę badań doświadczalnych zjawisk zachodzących w strukturze stopów aluminium 2024-T351 i D16CzATW w warunkach obciążenia kombinowanego. Dla badanych stopów aluminium zostały opracowane metodyki badań w warunkach quasi-statycznego, zasadniczego obciążenia rozciągającego i dodatkowego obciążenia impulsowego (tzw. obciążenie kombinowane).

Przeprowadzenie tego typu badań dla wybranych materiałów pozwoliło ustalić, że w warunkach wstępnego obciążenia kombinowanego dla stopu aluminium 2024-T351 charakterystyczny jest przebieg procesów zmian strukturalnych wywołany gwałtownymi zmianami energii w elementach układu obciążenia. Skutkiem tego jest zmiana właściwości mechanicznych badanego materiału wyrażająca się wzrostem ciągliwości przy powtórным rozciąganiu stopu aluminium 2024-T351. W zależności od szybkości narastania dodatkowego obciążenia impulsowego oraz jego amplitudy stop aluminium w zakresie odkształcenia

²ang. (*collective elementary carriers of plastic strain*) w fizyce plastyczności są to defekty kryształu, takie jak defekty punktowe, dyslokacje itp., które przemieszczają się zespołowo w wyniku silnego wzajemnego oddziaływania po osiągnięciu krytycznej gęstości [38].

całkowitego $0 \div 9\%$ wykazuje szerokie spektrum zmian strukturalnych. Stwierdzono przypadki testów podczas których próbki materiałowe wykazywały gwałtowny wzrost ciągliwości osiągający poziom do 40% wydłużenia A_5 , a także przypadki, podczas których ten sam stop ulegał natychmiastowemu zniszczeniu, wykazując cechy zbliżone do materiału kruchego.

Na podstawie oryginalnych wyników badań doświadczalnych udowodniono, że w warunkach obciążenia kombinowanego realizowanego za pomocą prostego układu mechanicznego możliwe jest zainicjowanie dynamicznych procesów nie zrównoważonych (*ang. non-equilibrium dynamic process - NDP*). Kluczowym zagadnieniem ze względu na poprawność metodyczną testu w warunkach obciążenia kombinowanego był wybór materiału o odpowiednich właściwościach mechanicznych na elementy pękające (zespół dwóch prętów zamocowanych równolegle do osi podłużnej próbki materiałowej) układu mechanicznego stanowiska laboratoryjnego. Dobierając charakterystyki wytrzymałościowe elementów pękających zmieniano prędkość narastania obciążenia (N/s) w układzie generującym dodatkowy impuls obciążenia. Kolejną ważną kwestią podjętą w pracy (A1) było ustalenie, odpowiedniej wartości prędkości narastania obciążenia, przy której następowało inicjowanie procesów NDP. Serie badań z zastosowaniem kamery do rejestracji zjawisk szybkozmiennych pozwoliły ustalić, że prędkość narastania obciążenia powinna mieścić się w zakresie od 300 do 500 MN/s, a różnica czasowa pomiędzy chwilami zerwania elementów pękających nie powinna wynosić więcej niż 3-4 ms.

Do analizy procesów NDP inicjowanych w stopach aluminium na skutek oddziaływania obciążenia kombinowanego wykorzystano folie monokrystaliczne jako tzw. „próbkę świadek”. Wyniki badań zastosowania ww. folii monokrystalicznej szczegółowo przedstawiono w pracy (A2). Dzięki zastosowanej technice pomiarowej otrzymano dane ilościowe o występowaniu procesów NDP, charakterystycznych dla zniszczenia całkowitego materiału próbki. Na podstawie orientacji pasm reliefu folii monokrystalicznej, która była naklejona na powierzchnie badanej próbki i pełniła funkcje czujnika uszkodzenia deformacyjnego stwierdzano fakt wystąpienia stanu krytycznego w materiale próbki.

Wystąpienie procesów NDP w badanych stopach wywołuje powstanie nowych struktur dyssypatywnych. Wyniki badań doświadczalnych, zestawione w pracy (A3), wykazały złożony charakter powstawania tych struktur. Proces ich formowania i rozwoju w stopach aluminium 2024 - T351 i D16CzATW w trakcie przebiegu procesów NDP odbywa się w dwóch etapach. Pierwszy charakteryzuje się przebiegiem procesu deformacji z dużą prędkością odkształcenia, zaś drugi etap zachodzi przy małych prędkościach. Jednakże w obszarach lokalnych struktury średnia wartość prędkości odkształcenia pierwszego etapu (czas trwania 7-10 ms) jest stosunkowo niska i wynosi około $1-3 \text{ s}^{-1}$. Z kolei dystrybucja powstałych struktur dyssypacyjnych w objętości badanej próbki zachodzi podczas etapu drugiego, w którym pomimo stosunkowo małej prędkości rozciągania próbki następuje gwałtowny wzrost prędkości odkształcenia osiągający w obszarach lokalnych nawet wartość $50-60 \text{ s}^{-1}$.

W pracy (A3) przedstawiano również dane doświadczalne dowodzące, że na powstawanie struktury dyssypatywnej mają wpływ wysokoczęstotliwościowe drgania układu mechanicznego powstające po dodatkowym obciążeniu impulsowym. Dla każdej próbki w strefie inicjowania odkształcenia zostały zidentyfikowane od 3 do 4 cykli drgań wysokiej częstotliwości oraz ustalono ich średnią arytmetyczną wartość. Także obliczono wartość średnią częstotliwości drgań i odchylenie standardowe na podstawie wyników badań

serii 25 próbek. Stwierdzono z prawdopodobieństwem 95%, że częstotliwość drgań układu mechanicznego mieści się w zakresie 1-2 kHz.

Zarazem w (A3) podjęto także problematykę kinetyki procesu odkształcenia stopów aluminium D16CzATW i 2024-T351 w trakcie przebiegu procesów NDP. Wyniki tych badań pozwoliły na ujawnienie różnic wpływu obciążenia kombinowanego i quasi-statycznego na kinetykę procesu odkształcenia. Różnice te są uwarunkowane powstaniem nowej, specyficznej struktury dyssypatywnej w wyniku zajścia procesów NDP, która ma odzwierciedlenie w zmianach kinetyki pola odkształcenia na powierzchni badanych. Przebieg procesów NDP powoduje zazwyczaj gwałtowne uplastycznienie stopów aluminium, dla których zauważono losowy rozkład procesów oscylacyjnych w obszarach lokalnego odkształcenia na obserwowanej powierzchni próbki. Konsekwencją tego jest - w przypadku stopu aluminium D16CzATW - opóźnienie formowania się szyjki, której początek powstawania odpowiada zakresowi odkształcenia $\sim 8-15\%$ podczas rozciągania. Natomiast dla stopu aluminium 2024-T351 stwierdzono, że początek formowania się szyjki występuje przy mniejszych wartościach odkształcenia, jednakże zaobserwowano wzrost lokalnego odkształcenia plastycznego w obszarze szyjki do poziomu 3-10 %.

Na podstawie wyników zestawionych w pracy (A3) stwierdzono różny charakter kinetyki pola odkształcenia w badanych stopach aluminium w zależności od wielkości odkształcenia. Wyróżniono trzy etapy przebiegu odkształcenia, w których następuje:

1. zwiększenie pasma lokalnego odkształcenia oraz zmiana orientacji jego niejednorodnego czoła o $\sim 90^\circ$;
2. rozerwanie pasma lokalnego odkształcenia na dwa pasma przemieszczające się w kierunkach przeciwnych;
3. rozerwanie poszczególnych pasm lokalnego odkształcenia na dwa pasma z dalszą konwergencją i formowaniem nowego pasma.

Obserwacja poszczególnych etapów kinetyki procesu odkształcenia pozwoliła także na ujawnienie faktu, że przy monotonicznym rozciąganiu inicjowanie powstania struktury dyssypacyjnej zaczyna się w mniej odkształconych obszarach materiału próbki. Analiza etapów kinetyki pozwoliła także na zweryfikowanie i potwierdzenie wartości prędkości odkształcenia, występujących w trakcie procesów NDP w stopach aluminium, które zostały wcześniej określone na podstawie obserwacji optycznych wykonanych za pomocą kamery cyfrowej.

Relacje pomiędzy przebiegiem mikromechanizmów deformowania i niszczenia mikrostruktury badanych stopów *Al* a kinetyką procesu odkształcenia powierzchni próbek były przedmiotem rozważań podjętych w pracach (A2, A4, A5).

Na podstawie analizy wyników badań w pracy (A4) ustalono, że mikromechanizmy niszczenia stopów aluminium 2024-T351 i D16CzATW są nieco inne pomimo ogólnego podobieństwa materiałów. Wynika to przede wszystkim z różnic w orientacji przestrzennej grup ziaren krystalicznych, jak i pojedynczych ziaren tych materiałów. Pomimo tego, proces niszczenia badanych materiałów jest zbliżony i kompleksowo łączy mechanizm plastycznego i kruchego niszczenia z dominującym wpływem jednego lub drugiego na danym etapie deformowania. Badania ujawniły, że impulsowe obciążenie w czasie wstępnego obciążenia kombinowanego na etapie deformowania sprężystego materiału powoduje małe odkształcenie niestacjonarne (na krzywej rozciągania widoczne w postaci oscylacji) i niewielka osłabienie mechaniczne materiału w porównaniu do wytrzymałości określonej przy rozciąganiu

monotonicznym. Odształcenia niestacjonarne przyczyniają się do powstania struktury synergetycznej, w której zachodzą ograniczone przemiany fazowe. Ich skutkiem może być przedwczesne niszczenia próbek przy kolejnym monotonicznym obciążeniu rozciąganiem. Przy dużym odształceniu plastycznym badanego materiału, przed impulsowym obciążeniem, odształcenie niestacjonarne zwiększa się prawie o rząd oraz obserwuje się znaczące osłabienie mechaniczne materiału. Zaobserwowane efekty prawdopodobnie związane są z powstaniem struktur synergetycznych w warunkach niestacjonarnego deformowania. W warunkach nieliniowej (plastycznej) deformacji samoorganizacja defektów struktury krystalograficznej może występować w formie kanałów płynięcia hydrodynamicznego, zwiększających plastyczność ziarna.

Wiarygodność uzyskanych wyników została potwierdzona w pracy (A5) wynikami analizy mikronapężenia w badanych materiałach. Na podstawie analizy ustalono, że w próbkach, które zniszczyły się przedwcześnie, tzn. przy nieprognozowanym poziomie odształcenia, wartość mikronapężenia jest znacznie wyższa w porównaniu do próbek poddanych wstępnemu obciążeniu kombinowanemu, a następnie zerwanych przy monotonicznym obciążeniu rozciągającym. Badanie statystyczne struktury zniszczonych próbek ujawniło obecność struktur relaksacyjnych w postaci ziaren zrekrystalizowanych o różnych rozmiarach (różnej skali) w stosunku do ziaren wzorcowych próbek z materiałów heterogenicznych poddawanych różnego typu obciążeniom. Zwiększenie liczby zrekrystalizowanych ziaren oraz ich rozdrobnienie w warunkach obciążenia kombinowanego prawdopodobnie wynika z kooperatywnego charakteru przebiegu niektórych procesów na atomowym, a możliwe, że i na elektronowym poziomie struktury deformowanego materiału. Ten problem wciąż wymaga dalszych badań. W podsumowaniu pracy (A5) stwierdzono, że obecne przewidywanie wytrzymałości materiału w warunkach kombinowanego obciążenia z określonym prawdopodobieństwem nie jest jeszcze możliwe.

Kolejna kwestia zawartą między innym w pracy (A6) cyklu publikacji monograficznych jest zagadnienie wpływu obciążenia zmęczeniowego na właściwości mechaniczne stopów aluminium 2024-T351 i D16CzATW poddanych wstępnie obciążeniu kombinowanemu. Inspiracją do podjęcia tego zagadnienia były wnioski wypływające z prac (A2-A5) o stabilności nowopowstałej struktury dyssypatywnej i braku występowania procesów relaksacyjnych po odciążaniu próbek.

Obydwa stopy Al po wstępnym obciążeniu kombinowanym badano w warunkach obciążenia wysokocyklowego, niskocyklowego, losowego oraz udarowego (próba udarowościowa). W celu dokonania analizy zmian strukturalnych została także wykonana obserwacja mikrofraktograficzne struktury stopów aluminium po każdym typie rodzaju obciążenia.

Na podstawie wyników przedstawionych badań ustalono, że warunki obciążenia kombinowanego determinują przebieg procesów zachodzących w badanych materiałach. Charakteryzują się one gwałtowną wymianą energii, prowadzącą do modyfikacji właściwości mechanicznych materiałów. Twierdzenie to dla obydwu stopów potwierdza się odpowiednimi zmianami strukturalnymi obserwowanymi na powierzchni przełomu próbek po wstępnym obciążeniu kombinowanym. Niewielkie różnice w zmianach strukturalnych występujących w stopach 2024-T351 i D16CzATW uwiadcniają się na powierzchniach przełomów. Różnice te prawdopodobnie są spowodowane różnym udziałem mechanizmów lokalnych procesów

deformowania w całkowitym procesie odkształcenia próbki na wszystkich poziomach strukturalnych.

Bez względu na zaobserwowane różnice w strukturze stopów 2024-T351 i D16CzATW w warunkach obciążenia wysokocyklowego uzyskano wzrost wytrzymałości o podobnej wielkości dla obydwu badanych materiałów. Otrzymany wynik świadczy o współmiernym kompleksowym charakterze końcowych, objętościowych zmian na wszystkich poziomach strukturalnych. Szczegółowy opis tego rodzaju badania przedstawiono również w autorskiej pracy [35].

Natomiast w pracy (A6) przedstawiono wyniki badań stopów w warunkach niskocyklowego obciążenia. Otrzymane wyniki doświadczalne dla stopów 2024-T351 oraz D16CzATW, w odróżnieniu od poprzedniego rodzaju obciążenia, ujawniły wyraźne różnice w wytrzymałości badanych materiałów. Stop aluminium 2024-T351 wykazuje spadek wytrzymałości nawet poniżej poziomu wytrzymałości tego materiału w stanie wyjściowym. Natomiast wytrzymałość stopu D16CzATW nieznacznie wzrasta lub nie przekracza poziomu materiału wyjściowego. Ujawniony charakter zmian wytrzymałości materiałów w warunkach niskocyklowego obciążenia obydwu stopów ewidentnie wynika z różnic w strukturze krystalicznej tych materiałów w stanie wyjściowym oraz z większym wpływem lokalnych procesów deformowania na nowopowstałe struktury dyssypacyjne na wszystkich poziomach strukturalnych.

Teza ta została potwierdzona wynikami badań doświadczalnych stopów 2024-T351 i D16CzATW w warunkach obciążenia losowego i udarowego, jak i badaniami fraktograficznymi. Dokładny opis badań stopów 2024-T351 i D16CzATW w warunkach obciążenia losowego i udarowego przedstawiono w [35], natomiast analiza fraktograficzna zawarta została w pracy (A7) monograficznego cyklu prac. Ogólne wnioski wpływające z zawartych tam rezultatów badań eksperymentalnych przedstawiają się następująco:

- badane stopy aluminium w warunkach obciążenia losowego ujawniają wzrost wytrzymałości w porównaniu do stany wyjściowego oraz do wytrzymałości wyznaczonej podczas badań wysokocyklowych z jednoczesnym szybkim wyczerpaniem plastyczności;
- w warunkach obciążenia udarowego stopy aluminium 2024-T351 i D16CzATW wykazują charakter odpowiedzi mechanicznej ogólnie podobnej do obciążenia niskocyklowego. Poziom odporności na uderzenie gwałtownie obniża się w stopie aluminium 2024-T351, natomiast w stopie D16CzATW nieznacznie zwiększa się w porównaniu do odporności materiału wyjściowego.

Taki charakter zmian właściwości mechanicznych stopów aluminium 2024-T351 i D16CzATW w przedstawionych wyżej warunkach obciążenia zainspirował do przeprowadzenia dogłębnej analizy fraktograficznej materiałów poddanych różnym rodzajom obciążenia, w tym materiałów w stanie wyjściowym. Zmiany właściwości mechanicznych badanych stopów na poziomie makro wyjaśniono w pracy (A7) głównie poprzez ujawnienie zasadniczych różnic w organizacji układu struktury w stanie wyjściowym. Dla różnych warunków obciążenia zaobserwowano osobliwości przebiegu mechanizmów deformowania i niszczenia w stopach *Al* na wszystkich poziomach struktury dyssypacyjnej. Ponadto stwierdzono, że na różnice we właściwościach badanych stopów mają także wpływ relacje

między układem struktury w stanie wyjściowym, a przebiegiem mechanizmów deformowania struktury dyssypacyjnej.

Ujawnione zależności determinują osobliwości sprężysto-plastycznego odkształcenia stopów aluminium 2024-T351 i D16CzATW w warunkach niskocyklowego obciążenia, zwłaszcza po wstępnym obciążeniu kombinowanym. Zatem niezbędne jest uwzględnienie tego faktu w ocenie wytrzymałości zmęczeniowej badanych materiałów za pomocą odpowiednich kryteriów. Wybór materiału do weryfikacji odkształceniowego i energetycznego kryterium niszczenia dokonano na podstawie parametrów wytrzymałościowych stopu aluminium D16CzATW zawartych w pracy (A6).

Stop ten został poddany wnikliwym analizom w pracy (A8), w której zbadano zależności sprężysto-plastycznego deformowania aluminium D16CzATW w warunkach niskocyklowego obciążenia zarówno w stanie wyjściowym, jak po wstępnym obciążeniu kombinowanym. W obu przypadkach, wytrzymałość zmęczeniowa materiału była ustalana na podstawie odkształceniowego i energetycznego kryterium zniszczenia. Doświadczalnie ustalono, że cykliczne sprężysto-plastyczne odkształcenie stopu aluminium D16CzATW w stanie wyjściowym powoduje zmniejszenie szerokości pętli histerezy δ_k wraz ze wzrostem całkowitej amplitudy odkształcenia ε_a . Po wstępnym obciążeniu kombinowanym szerokości pętli histerezy δ_k zwiększały się wraz ze wzrostem całkowitej amplitudy odkształcenia ε_a badanego stopu. Cykliczne sprężysto-plastyczne odkształcenie stopu D16ChATW po wstępnym obciążeniu kombinowanym wywołuje zmiany właściwości mechanicznych i cyklicznie osłabia materiał. Stwierdzono, że energia zmęczeniowego niszczenia W_f stopu aluminium D16ChATW w stanie wyjściowym i po wstępnym obciążeniu kombinowanym w warunkach cyklicznego sprężysto-plastycznego odkształcenia nie zależy od ilości cykli w zakresie $10^1 \dots 10^4$ do zainicjowania pęknięcia N_f .

Wyniki badań fraktograficznych stopu D16ChATW w warunkach niskocyklowego obciążenia dla stanu wyjściowego oraz po wstępnym obciążeniu kombinowanym bardzo dobrze korespondują z wnioskami sformułowanymi w pracy (A7) i zadowalająco potwierdzają wyniki oceny wytrzymałości zmęczeniowej dokonanej za pomocą odkształceniowego i energetycznego kryterium.

Potrzeba przewidywania pozostałych reakcji mechanicznych stopów aluminium 2024-T351 i D16CzATW (tj. granica plastyczności, wydłużenie itd.), bazując na dużej liczbie danych doświadczalnych, w warunkach wstępnego obciążenia kombinowanego wymagała opracowania odpowiednich modeli analitycznych. Modele te przedstawiono w pracy (A9), w której dokonano analitycznego opisu stanu naprężeniowo-odkształceniowego elastycznej prostokątnej płytki w warunkach obciążenia dynamicznego w ujęciu jednowymiarowym i dwuwymiarowym. Z wykorzystaniem transformacji całkowej Laplace'a uzyskano rozwiązanie zagadnienia dwuwymiarowego drgania prostokątnej płytki sprężystej. Rozwiązanie uzyskano dla założenia, że powierzchnia płytki, na której działa obciążenie jest częściowo zamocowana.

W przypadku szczególnym dwuparametrycznej postaci funkcji obciążenia monotonicznego (rozciągającego), dla której przez wybór parametrów osiąga się fizycznie realistyczny obraz szybkiego, ale nie impulsowego wzrostu obciążenia, zastosowano transformaty odwrócone i otrzymano zbieżne sumy niezbędne do wyznaczenia pól naprężenia i odkształcenia w każdej chwili czasu. W celu przeprowadzenia analizy dla ogólnego przypadku, gdy na stałe obciążenie jest nałożona dynamiczna składowa, zaproponowano

statystyczne rozwiązanie zagadnienia. Przeprowadzono obliczenia dla czterech wartości parametru obciążenia, który określa szybkość narastania impulsu obciążenia.

Uzyskane ogólne rozwiązanie problemu dynamicznego z uwzględnieniem termosprężystości płytki prostokątnej umożliwiło opis zjawiska spowolnienia procesu odkształcenia próbki w wyniku transformacji energii mechanicznej w ciepło. Okres spowalniania jest dłuższy, o kilka rzędów niż czas interakcji dynamicznych. Fakt ten, w połączeniu ze znajomością zależności pomiędzy granicą plastyczności a prędkością odkształcenia, może być podstawą badania teoretycznego, obserwowanego doświadczalnie zjawiska nietypowego zachowania się materiałów w warunkach impulsowych obciążeń dynamicznych.

W celu weryfikacji adekwatności zaproponowanych modeli analitycznych został również opracowany uproszczony model numeryczny procesów NDP w warunkach sprężysto - plastycznego obciążenia płytki prostokątnej. Szczegółowy opis tego modelu przedstawiono w autorskiej pracy [35]. Model opisuje przejściowy stan naprężeniowo-odkształceniowy płytki prostokątnej po impulsowym obciążeniu z uwzględnieniem transformacji energii mechanicznej w ciepłą.

Metoda elementów skończonych (MES) została wykorzystana również do badania pól naprężenia i odkształcenia w prostokątnej cienkiej płaskiej próbce przy impulsowym skokowym obciążeniu jej przeciwległych stron. Materiał próbki opisano równaniem konstytutywnym idealnie sprężysto-plastycznego materiału. Dzięki opracowanemu modelowi numerycznemu zbadano:

- zmianę energii plastycznej w zakresie monotonicznego wzrostu do osiągnięcia maksimum;
- zmianę energii całkowitego odkształcenia próbki;
- proces propagacji fal naprężenia i rozwój odkształcenia plastycznego w próbce.

Stwierdzono, że otrzymane rezultaty analiz numerycznych są fizycznie wiarygodne i zadowalająco korespondują z wynikami doświadczalnymi. W przypadku idealnie sprężystego modelu materiału wyniki analizy MES są jakościowo zgodne z wynikami rozwiązania analitycznego, a niewielkie różnice ilościowe wynikają z tego, że w rozwiązaniu analitycznym obciążenie nie miało charakteru impulsowego, a także warunki brzegowe nieco się różniły.

Rezultaty modelowania teoretycznego oraz wyniki badań doświadczalnych stopów aluminium stały się podstawą dla opracowania metodyki oszacowania wytrzymałości układów mechanicznych w warunkach niezerównoważonych dynamicznych procesów. W pracy (A10) sformułowano założenia do modelu deterministycznego zachowania się materiału w warunkach niezerównoważonych dynamicznie procesów oraz opracowano metodykę obliczenia wytrzymałości elementów konstrukcyjnych z uwzględnieniem tych procesów.

Model deterministyczny uwzględnia zjawisko krótkotrwałego osłabienia mechanicznego różnych gatunków materiałów w warunkach dynamicznego obciążenia. Jak wynika z badań mikroskopowych efekt osłabienia jest skutkiem powstawania struktur dyssypacyjnych w postaci lokalnych cienkich pasm połączonych wzajemnie w objętości materiału na różnych poziomach strukturalnych. Struktury te powstają przy stosunkowo niskich prędkościach odkształcenia $2\div 60\text{ s}^{-1}$. Jednocześnie stwierdzono, że niezerównoważone dynamiczne procesy są związane z ogólnym odkształceniem próbki i znacząco wpływają na kinetykę odkształcenia wywołaną obciążeniem zasadniczym. Skutkiem tego jest brak

możliwości określenia lokalnego obszaru największego uszkodzenia materiału konstrukcyjnego, a więc i miejsca inicjacji niszczenia. W związku z tym na podstawie wyników doświadczalnych zaproponowano zależność opisującą związek pomiędzy naprężeniem niszczącym K_{min} a parametrem k charakteryzującym dynamiczny proces niezerównoważony. Opracowano algorytm i procedurę obliczania wytrzymałości na podstawie parametrów fenomenologicznych, które uwzględniają wpływ rozwiązania konstrukcyjnego układu mechanicznego.

Podsumowując przedstawiony opis cyklu artykułów monograficznych do najważniejszych osiągnięć naukowych zaliczam:

- 1) Badania doświadczalne nad zjawiskami zachodzącymi w strukturze wielofazowych stopów aluminium 2024-T351 oraz D16CzAWT w warunkach obciążenia kombinowanego. Ustalono, że w zależności od szybkości narastania dodatkowego obciążenia impulsowego oraz jego amplitudy stopy aluminium w zakresie odkształcenia całkowitego $0 \div 9\%$ wykazują szerokie spektrum zmian strukturalnych. Ponadto, zaobserwowano przypadki testów, podczas których próbki materiałowe wykazywały gwałtowny wzrost ciągliwości osiągający poziom nawet 40% wydłużenia A_5 , a także przypadki, gdy ten sam stop ulegał natychmiastowemu zniszczeniu, wykazując cechy zbliżone do materiału kruchego. W wyniku badań doświadczalnych ujawniono, że impulsowe obciążenie w czasie wstępnego obciążenia kombinowanego na etapie sprężystego deformowania materiałów powoduje małe oscylacje na krzywej naprężenie – odkształcenie (tzw. odkształcenia niestacjonarne) i niewielkie osłabienie mechaniczne materiałów w porównaniu do wytrzymałości określonej przy rozciąganiu monotonicznym.
- 2) Oryginalne wyniki badań doświadczalnych, na podstawie których udowodniono, że w warunkach obciążenia kombinowanego realizowanego za pomocą prostego układu mechanicznego możliwe jest zainicjowanie dynamicznych procesów niezerównoważonych (*ang. non-equilibrium dynamic process - NDP*). Wystąpienie procesów NDP w badanych stopach wywołuje powstanie nowych struktur dyssypatywnych. Proces ich formowania i rozwoju w stopach aluminium 2024 - T351 i D16CzATW w trakcie przebiegu procesów NDP jest złożony i odbywa się w dwóch etapach. Pierwszy charakteryzuje się przebiegiem procesu deformacji z dużą prędkością odkształcenia, zaś drugi etap zachodzi przy małych prędkościach. Cechą charakterystyczną drugiego etapu jest dystrybucja powstałych struktur dyssypacyjnych w objętości badanej próbki, gdzie pomimo stosunkowo małej prędkości rozciągania próbki w obszarach lokalnych następuje gwałtowny wzrost prędkości odkształcenia osiągający nawet wartość $50-60 \text{ s}^{-1}$. Otrzymane dane doświadczalne dowodzą, że na powstawanie struktury dyssypatywnej mają również wpływ wysokoczęstotliwościowe drgania układu mechanicznego powstające po dodatkowym obciążeniu impulsowym. Stwierdzono z prawdopodobieństwem 95%, że częstotliwość drgań układu mechanicznego mieści się w zakresie 1-2 kHz.
- 3) Wyniki badań metalograficznych struktury synergetycznej, w której zachodzą ograniczone przemiany fazowe spowodowane odkształceniem niestacjonarnym. Przy dużym odkształceniu plastycznym badanych stopów aluminium, przed impulsowym

obciążeniem, odkształcenie niestacjonarne zwiększa się prawie o rząd oraz obserwuje się znaczące osłabienie mechaniczne materiału. W warunkach nieliniowej (plastycznej) deformacji samoorganizacja defektów struktury krystalograficznej występuje w formie kanałów płynięcia hydrodynamicznego, zwiększających plastyczność ziaren. Badania statystyczne struktury zniszczonych próbek ujawniły obecność struktur relaksacyjnych w postaci ziaren zrekrytalizowanych o różnych rozmiarach (różnej skali) w stosunku do ziaren wzorcowych próbek z materiałów heterogenicznych poddawanych różnego typu obciążeniom. Zwiększenie liczby zrekrytalizowanych ziaren oraz ich rozdrobnienie w warunkach obciążenia kombinowanego prawdopodobnie wynika z kooperatywnego charakteru przebiegu niektórych procesów na atomowym, a możliwe, że i na elektronowym poziomie struktury deformowanego materiału. Powoduje to, że przewidywanie wytrzymałości materiału z określonym prawdopodobieństwem w warunkach niekontrolowanych dodatkowych obciążeń impulsowych nie jest obecnie jeszcze możliwe.

- 4) Wyniki badań doświadczalnych w warunkach obciążenia wysokocyklowego, niskocyklowego, losowego oraz udarowego (próba udarnościowa) stopów aluminium 2024-T351 i D16CzATW po wstępnym obciążeniu kombinowanym. Dla obydwu badanych materiałów w warunkach obciążenia wysokocyklowego stwierdzono podobny wzrost wytrzymałości zmęczeniowej. Z kolei wyniki badań stopów w warunkach niskocyklowego obciążenia ujawniły wyraźną różnicę w wytrzymałości badanych materiałów. Stop aluminium 2024-T351 wykazuje spadek wytrzymałości nawet poniżej poziomu wytrzymałości w stanie wyjściowym. Natomiast wytrzymałość stopu D16CzATW nieznacznie wzrasta lub nie przekracza poziomu wytrzymałości materiału wyjściowego. Badane stopy aluminium w warunkach obciążenia losowego wykazują wzrost wytrzymałości w porównaniu do stanu wyjściowego oraz do wytrzymałości wyznaczonej podczas badań wysokocyklowych z jednoczesnym szybkim wyczerpaniem plastyczności. Ponadto stwierdzono, że w warunkach obciążenia udarowego stopy aluminium 2024-T351 i D16CzATW wykazują charakter odpowiedzi mechanicznej ogólnie podobny do obciążenia niskocyklowego. Poziomą odporność na uderzenie gwałtownie obniża się w stopie aluminium 2024-T351, podczas gdy w stopie D16CzATW nieznacznie zwiększa się w porównaniu do odporności materiału w stanie wyjściowym.
- 5) Przeprowadzenie dogłębnej analizy fraktograficznej stopów aluminium poddanych różnym rodzajom obciążenia, w tym materiałów w stanie wyjściowym. Zmiany właściwości mechanicznych badanych stopów na poziomie makro wyjaśniono głównie poprzez ujawnienie zasadniczych różnic w organizacji układu struktury w stanie wyjściowym. Dla różnych warunków obciążenia zaobserwowano osobliwości przebiegu mechanizmów deformowania i niszczenia w stopach *Al* na wszystkich poziomach struktury dyssypacyjnej. Stwierdzono, że na różnice we właściwościach badanych stopów mają także wpływ relacje pomiędzy układem struktury w stanie wyjściowym, a przebiegiem mechanizmów deformowania struktury dyssypacyjnej.
- 6) Ujawnienie zależności sprężysto-plastycznego deformowania aluminium D16CzATW w warunkach niskocyklowego obciążenia zarówno w stanie wyjściowym, jak i po

wstępnym obciążeniu kombinowanym. Doświadczalnie ustalono, że cykliczne sprężysto-plastyczne odkształcenie stopu aluminium D16CzATW w stanie wyjściowym powoduje zmniejszenie szerokości pętli histerezy δ_k oraz wzrost całkowitej amplitudy odkształcenia ε_a . Po wstępnym obciążeniu kombinowanym szerokości pętli histerezy δ_k zwiększały się wraz ze wzrostem całkowitej amplitudy odkształcenia ε_a badanego stopu. Stwierdzono, że energia zmęczeniowego niszczenia W_f stopu aluminium D16ChATW w stanie wyjściowym i po wstępnym obciążeniu kombinowanym w warunkach cyklicznego sprężysto-plastycznego odkształcenia nie zależy od ilości cykli w zakresie $10^1 \dots 10^4$ do zainicjowania pęknięcia N_f .

- 7) Opracowanie modelu analitycznego opisującego stan naprężeniowo-odkształceniowy elastycznej prostokątnej płytki w warunkach obciążenia dynamicznego w ujęciu jednowymiarowym i dwuwymiarowym. Z wykorzystaniem transformacji całkowej Laplace'a uzyskano rozwiązanie zagadnienia dwuwymiarowego drgania prostokątnej płytki sprężystej. W celu przeprowadzenia analizy dla ogólnego przypadku, gdy na stałe obciążenie jest nałożona dynamiczna składowa, zaproponowano statystyczne rozwiązanie zagadnienia. Przeprowadzono obliczenia dla czterech wartości parametru obciążenia, który określa szybkość narastania impulsu obciążenia. Uzyskane ogólne rozwiązanie problemu dynamicznego z uwzględnieniem termosprężystości płytki prostokątnej umożliwiło opis zjawiska spowolnienia procesu odkształcenia próbki w wyniku transformacji energii mechanicznej w ciepło.
- 8) Opracowanie uproszczonego modelu numerycznego opisującego procesy NDP w warunkach sprężysto - plastycznego obciążenia płytki prostokątnej. Zaproponowany model wykorzystano do celu weryfikacji adekwatności opracowanych modeli analitycznych oraz do badania pól naprężenia i odkształcenia w prostokątnej cienkiej płaskiej próbce przy impulsowym skokowym obciążeniu jej przeciwległych stron. Otrzymane rezultaty analiz numerycznych uznano za fizycznie wiarygodne i zadowalająco korespondujące z wynikami doświadczalnymi. W przypadku idealnie sprężystego modelu materiału wyniki analizy MES są jakościowo zgodne z wynikami rozwiązania analitycznego, a niewielkie różnice ilościowe wynikają z tego, że w rozwiązaniu analitycznym obciążenie nie miało charakteru impulsowego, a także nieco różniły się warunki brzegowe.
- 9) Sformułowanie założeń do modelu deterministycznego zachowania się materiału w warunkach nie zrównoważonych dynamicznie procesów oraz opracowanie metodyki obliczenia wytrzymałości elementów konstrukcyjnych z uwzględnieniem tych procesów. Model deterministyczny uwzględnia zjawisko krótkotrwałego osłabienia mechanicznego różnych gatunków materiałów w warunkach dynamicznego obciążenia. Ponadto, wyprowadzenie zależności na związek pomiędzy naprężeniem niszczącym $K_{\sigma min}$ a parametrem k charakteryzującym dynamiczny proces nie zrównoważony. W oparciu na ww. zależności opracowano algorytm i procedurę obliczania wytrzymałości na podstawie parametrów fenomenologicznych, które uwzględniają wpływ rozwiązania konstrukcyjnego układu mechanicznego.

3. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych.

Studia wyższe ukończyłem na Wydziale Mechaniczno-Technologicznym Tarnopolskiego Instytutu Budowy Aparatury (obecnie Tarnopolski Narodowy Uniwersytet Techniczny imienia Iwana Puluja) w specjalności „Systemy i obrabiarki dla obróbki skrawaniem metali” w 1995 roku uzyskując tytuł inżyniera. W październiku tegoż roku rozpocząłem studia doktoranckie w dyscyplinie „Mechanika pękania” w specjalności „Mechanika deformowanego ciała stałego” pod opieką naukową prof. Petra Yasnija.

Obszar mojego zainteresowania naukowego obejmował badania wpływu wstępnego obciążenia cyklicznego na odporność na kruche pękanie stali żarowytrzymałej stosowanej na korpusy reaktorów jądrowych typu WWER.

W trakcie realizacji studiów doktoranckich w latach 1995-1998 oraz pracy nad rozprawą doktorską zdobyłem duże doświadczenie w prowadzeniu badań wytrzymałościowych i badaniu odporności na pękanie w warunkach kriogenicznych temperatur. Ponadto, nabyłem praktycznych umiejętności w badaniu przełomów próbek za pomocą mikroskopii elektronowej, analizy fraktograficznej oraz opracowałem szereg aplikacyjnych programów obliczeniowych w celu ułatwienia obróbki danych doświadczalnych.

W 2002 roku obroniłem pracę doktorską pt. „Wpływ wstępnego obciążenia cyklicznego na odporność na kruche pękanie stali żarowytrzymałej” i uzyskałem stopień doktora inżyniera w dyscyplinie „Mechanika pękania” w specjalności „Mechanika deformowanego ciała stałego”.

Wyniki rozprawy doktorskiej w zakresie metodyki prognozowania wpływu historii obciążenia (amplitudy i ilości cykli) na odporność na kruche pękanie zostały wdrożone w Zakładzie Zmęczenia i Zmęczenia Ciepłego Materiałów Instytutu Problemów Wytrzymałości NAN Ukrainy. (Akt wdrożenia Nr 305 od 14.05.2001). Metodyka ta jest stosowana do oceny nośności i trwałości elementów konstrukcji z pęknięciami.

W 2001 roku zostałem zatrudniony jako młody pracownik naukowo-dydaktyczny na stanowisku asystenta w katedrze Materiałoznawstwa Wydziału Elektromechanicznego Tarnopolskiego Narodowego Uniwersytetu Technicznego imienia Iwana Puluja. W kolejnych latach pracowałem w tej katedrze na stanowiskach: starszego wykładowcy (2002-2003), starszego pracownika naukowego i na stanowisku docenta (2003-2006). W 2005 r. po uzyskaniu tytułu naukowego docenta objąłem stanowisko docenta Katedry Materiałoznawstwa.

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych nadal zajmowałem się problematyką odporności na niszczenie kruche stali żarowytrzymałych z uwzględnieniem lokalnych kryteriów niszczenia oraz wpływem obciążenia termomechanicznego na odporność kruchego pękania. W tym okresie opublikowałem 23 artykuły współautorskie oraz wygłosiłem ponad 15 referatów na konferencjach o zasięgu krajowym i międzynarodowym.

Wspomniana tematyka była realizowana w latach 2002-2006 w ramach takich projektów badawczych, jak: (1) *Opracowanie metod prognozowania pękania dynamicznego materiałów konstrukcyjnych z uwzględnieniem czynników obciążenia cyklicznego*, (2) *Prognozowanie wpływu wstępnego obciążenia termomechanicznego na wytrzymałość quasi-kruchego pękania korpusów reaktorów jądrowych*, (3) *Opracowanie metody oceny*

żywołności stopów aluminium w warunkach obciążenia losowego finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Ukrainy, Fundację Badań Podstawowych, w których byłem głównym wykonawcą. W tym czasie brałem również udział, jako główny wykonawca, w realizacji bilateralnych ukraińsko - słoweńskich projektów międzynarodowych o tematyce: Modelowanie mikrouszkodzenia za pomocą wglębniaka Vickersa oraz Wytrzymałość zmęczeniowa stali gruboziarnistej z mikrostrukturalnie małymi uszkodzeniami.

W tym okresie podejmowałem również działalność dydaktyczną. Wykłady, ćwiczenia audytoryjne oraz laboratoryjne prowadziłem z następujących przedmiotów: *Systemy Technologiczne, Technologia Materiałów Konstrukcyjnych, Materiałoznawstwo i Obróbka Materiałów, Spawanie Materiałów i Mechanika Pękania*. Jestem współautorem skryptu z przedmiotu *Koncepcje współczesnej natury* oraz *Materiałoznawstwo i Materiały Konstrukcyjne*.

W zakresie działalności organizacyjnej w okresie pracy w Tarnopolskim Narodowym Uniwersytecie Technicznym imienia Iwana Puluja na mój dorobek składa się pełnienie następujących funkcji:

- sekretarza naukowego Katedry Materiałoznawstwa w latach 2002-2003;
- dyrektora wykonawczego Tarnopolskiej obwodowej filii Ukraińskiego związku inteligencji naukowo- technicznej w latach 2002-2006;
- pełnomocnika prorektora ds. naukowych do spraw kół naukowych studentów w latach 2003-2006;
- członka Rady Wydziału Elektromechanicznego w latach 2002-2006;
- członka Senatu Tarnopolskiego Narodowego Uniwersytetu Technicznego imienia Iwana Puluja w latach 2003-2006;
- członka Specjalnej Rady Naukowej ds. tytułów i stopni naukowych w specjalności „Mechanika pękania” i „Matematyczne modelowanie” w latach 2003-2006.

Ponadto w latach 2002-2006 byłem członkiem dwóch komitetów organizacyjnych konferencji międzynarodowych: *4th International Symposium on Tribo-Fatigue (ISTF4)* oraz *First International Conference Dynamics, Strength, and Reliability of Agricultural Machines (DSRAM-I)*.

Za całokształt działalności akademickiej otrzymałem w latach 2004-2006 stypendium Gabinetu Ministrów Ukrainy oraz współautorski Grand Prezydenta Ukrainy dla Młodych Pracowników Nauki pt. *Ocena trwałości konstrukcji ze stopów aluminium z pęknięciem w warunkach obciążenia nieregularnego*.

W październiku 2006 roku zostałem zatrudniony w Wydziale Mechanicznym Wojskowej Akademii Technicznej w Katedrze Budowy Maszyn w Zakładzie Podstaw Konstrukcji Maszyn i Geometrii Wykreślnej na stanowisku starszego specjalisty. Od października 2007 roku na podstawie mianowania objąłem stanowisko adiunkta naukowo-dydaktycznego w Wydziale Mechanicznym. Z kolei w latach 2014-2016 od momentu przekształcenia Katedry w Instytut Budowy Maszyn pełniłem również funkcję Kierownika Zakładu Podstaw Konstrukcji Maszyn.

W związku ze zmianą miejsca zatrudnienia skupiłem się w swojej działalności naukowej na problematyce zmian właściwości mechanicznych materiałów konstrukcyjnych w warunkach odkształcenia plastycznego oraz na wybranych zagadnieniach tematyki wytrzymałości zmęczeniowej stopów aluminium stosowanych w różnych obszarach przemysłu

i gospodarki. Tematyka ta naturalnie wynikała z tradycji szkoły naukowej prof. S. Kocańdy pielęgnowanej przez pracowników zespołu w którym pracowałem. Zainspirowany badaniami prof. Doroty Kocańdy w obszarze krótkich pęknięć skupiłem swoją uwagę między innym na badaniu tego zjawiska zarówno w elementach konstrukcji lotniczych, jak i w samych stopach aluminium stosowanych w lotnictwie. W wyniku tego opublikowano szereg artykułów naukowych i referatów konferencyjnych o zasięgu krajowym i międzynarodowym. Do najważniejszych publikacji zaliczam współautorskie rozdziały w monograficznej serii *Fatigue of aircraft structures* w latach 2009-2011. Tematyka ta była również podejmowana w ramach uzyskanego przez mnie w 2007 roku projektu pt. *Analiza wpływu mikrodefektów na wytrzymałość zmęczeniową połączeń nitowych w warunkach stałoaamplitudowego obciążenia* finansowanego przez WAT. Problematyka była kontynuowana w kolejnym projekcie wewnętrznym pt. *Przewidywanie trwałości zmęczeniowej konstrukcyjnych elementów w eksploatacyjnych warunkach z uwzględnieniem wpływu wstępnego uszkodzenia struktury oraz rozwoju krótkich pęknięć* realizowanym w 2009 roku.

Oprócz wspomnianej tematyki także angażowałem się w badaniach podejmowanych przez zespół mojego zakładu. Obejmowały one problematykę spawania i ocenę wytrzymałości połączeń spawanych w blachach stali austenitycznej. Badania były między innym realizowane w latach 2010-2011 w ramach bilateralnego projektu polsko słoweńskiego pt: *Zastosowanie techniki laserowej do spawania elementów ze stali stosowanych na odpowiedzialne konstrukcje metalowe*, w którym pełniłem rolę głównego wykonawcy.

Doświadczenie zdobyte podczas realizacji ww. projektów zaowocowały pozyskaniem projektu pt. *Wpływ wstępnego obciążenia kombinowanego na kształtowanie własności mechanicznych wybranych stopów aluminium*, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w latach 2011-2014. W projekcie tym pełniłem funkcję zarówno kierownika projektu, jak i głównego wykonawcy.

Obecnie uczestniczę jako wykonawca w realizacji projektu pod pt. *Badanie zjawisk termomechanicznych w trakcie procesów spawania lekkich stopów w aplikacjach militarnych*, PBG/13-998, 2018-2022, finansowanym przez Ministerstwo Obrony Narodowej.

Tematyka realizowanych badań była przedstawiana w licznych artykułach publikowanych na łamach renomowanych czasopism indeksowanych w bazie WEB of Science oraz prezentowana na konferencjach międzynarodowych. W tym czasie także powstała monografia pt. *Wpływ czynników eksploatacyjnych na odkształcenie i niszczenie stali stosowanych na korpusy reaktorów* pod redakcją: P. Yasniy, I. Okipny, V. Hutsaylyuk. Monografia ta jest podsumowaniem mojej działalności naukowej na Tarnopolskim Narodowym Uniwersytecie Technicznym imienia Iwana Puluja w latach 2002-2006.

Do najważniejszych osiągnięć w zakresie działalności organizacyjnej i popularyzatorskiej w okresie pracy w Wojskowej Akademii Technicznej zaliczam realizację, jako kierownik, wysokobudżetowego projektu inwestycyjnego w latach 2014-2015, finansowanego w ramach Planu Modernizacji Technicznej SZ RP w latach 2015 – 2022, pt. *Zakup wyposażenia, projekt i organizacja laboratorium badań zjawisk dynamicznych w warunkach impulsowego obciążenia wysokoenergetycznego*. W wyniku realizacji tej inwestycji aparaturowej i mojej aktywności organizatorskiej oraz przy współpracy z firmą MTS utworzono laboratorium, z unikatową na skalę europejską serwohydrauliczną maszyną zmęczeniową z możliwością realizacji dodatkowego obciążenia impulsowego.

Jako pracownik naukowo-dydaktyczny w 2013 brałem udział w realizacji projektu *Zarządzanie własnością intelektualną – klucz do sukcesu w relacjach nauki z biznesem* w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, Priorytet IV Szkolnictwo Wyższe i Nauka, Działanie 4.2 Rozwój kwalifikacji kadr systemu B+R i wzrost świadomości roli nauki w rozwoju gospodarczym, Europejski Fundusz Społeczny w latach 2012-2014.

Odbyłem szereg szkoleń otwartych i warsztatów dedykowanych zakresu zarządzania własnością intelektualną, które zakończyły się stażem o charakterze rozwojowo-innowacyjnym w Uniwersytecie Mariboru (Słowenia). Brałem również udział w programie 7 FP Marie Curie Actions. International Research Staff Exchange Scheme. Innovative Nondestructive Testing and Advanced Composite Repair of Pipelines with Volumetric Surface Defects. (INNOPIPES) No 318874. 2012-2016, jako wykonawca zadania projektowego 3.1. W trakcie tego programu odbyłem staż badawczo-szkoleniowy w Instytucie Elektrosprawalnictwa im. E. O. PATONA NAN Ukrainy.

W ramach nawiązania współpracy międzynarodowej prezentowałem możliwości badawcze Instytutu Budowy Maszyn podczas cyklicznych warsztatów pt. *Cooperation with scientists, researcher and entrepreneurs from North Rhine Westphalia during the event Successful R&I in Europe*, 2013, Düsseldorf, Germany.

W ramach programu *Erasmus+ HE Staff Mobility Agreement for Training* w 2018 roku odbyłem staż szkoleniowy w uniwersytecie Obrony w Brnie (Czechy) oraz w uniwersytecie w Klajpedzie, (Litwa).

Od 2007 roku jestem członkiem międzynarodowego komitetu naukowego konferencji *International Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems ITELMS'* oraz od 2018 roku *International Scientific Conference Challenges to National Defence in Contemporary Geopolitical Situation* na Litwie. Z kolei od 2002 roku jestem członkiem Ukraińskiego Związku Naukowego Mechaników Pękania, a od 2006 roku członkiem Polskiej grupy European Structural Integrity Society (ESIS).

Moja aktywność w nawiązywaniu współpracy międzynarodowej wyraża się w stałych kontaktach z pracownikami naukowymi takich ośrodków naukowo – badawczych, jak Narodowy Uniwersytet Techniczny im. I. Pułuj'a w Tarnopolu, Instytut Metalofizyki im. G.W. Kurdjumowa NAN Ukrainy, Narodowy Uniwersytet Bioresursów i Wykorzystania Natury Ukrainy, Uniwersytet w Mariborze (Słowenia), Technologiczny Uniwersytet w Kownie (Litwa) i wielu innymi w ramach realizowanych projektów i indywidualnej współpracy.

Byłem promotorem 4 prac inżynierskich i 1 magisterskiej, a ponadto opiekowałem się 2 doktorantami jako promotor pomocniczy w latach 2014 – 2018.

Pełniłem funkcje eksperta projektów badawczo-wdrożeniowych w NCBiR, a obecnie jestem recenzentem trzech czasopism wydawnictw Elseviera i Springer. Dotychczas wykonałem dla tych czasopism 20 recenzji.

W ramach działalności dydaktycznej prowadzę zajęcia z przedmiotów *Grafika Inżynierska* oraz *Podstawy Konstrukcji Maszyn* dla studentów I i II stopnia. Jestem autorem opracowań wersji elektronicznej pomocy dydaktycznej dla studentów kierunku *Logistyka* oraz *Budowa i Eksploatacja Maszyn* na studiach stacjonarnych i niestacjonarnych.

Za osiągnięcia dydaktyczne w 2015 roku, jako członek zespołu otrzymałem Zespołową nagrodę za osiągnięcia dydaktyczne Ministra Obrony Narodowej.

LITERATURA

1. BONDAR' M. P., PANIN S. V., KOVAL' A. B., OBODOVSKIJ E. S., *Strukturnye urovni deformacii vnutrenneokislennoj medi so sloistoj vnutrennej strukturoj*, Fizicheskaja mezomehanika, T. 6, nr 2, 2003, s. 77-90.
2. PANIN S. V., *Plastic deformation and fracture caused by coating-substrate mismatch at mesoscale*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, - Vol. 35, 2001, p. 1-8.
3. PLESHANOV B. C., PANIN V. E., KOBZEVA S. A., *Kinetika polosovyh mezoskopicheskikh struktur i razrushenie polikristallov austenitnoj hromonikelevoj stali s protjazhennymi makrokoncentratorami naprjazhenij*, Fizicheskaja mezomehanika, T. 5, nr 6, 2002, s. 65-71.
4. BARENBLATT G.I., *Model' nelokal'nogo nakoplenija povrezhdenij*, Fizicheskaja mezomehanika, 2003, T.6., nr 4, s. 85-92.
5. BUSHMANOVA O.P., REVUZHENKO A.F., *O plasticheskom deformirovanii v usloviyah lokalizacii sdvigov na diskretnoj sisteme linij*, Fizicheskaja mezomehanika, 2002, T. 5, nr 3, s. 9-16.
6. ELSUKOVA T.F., PANIN V.E., *Evoljucija strukturnyh urovnej deformacii i samoorganizacija mezoskopicheskoy substrukturny v polikristallah*, Metally, 1992, nr2, s. 73-89.
7. *Fizicheskaja mezomehanika i komp'juternoe konstruirovanie materialov* / Pod red. PANINA V.E., Novosibirsk, Nauka, 1995, T. 1, s. 298, T. 2., s.320.
8. MAKAROV P.V., *Modelirovanie uprugoplasticheskoy deformacii i razrushenija neodnorodnyh sred na mezourovne*, Fizicheskaja Mezomehanika, T. 6, nr 4, 2003, s. 111-124.
9. NEMIROVSKIJ JU., MISHHENKO A., *Vlijanie vybora materialov i struktury konstrukcii na plasticheskoe deformirovanie i razrushenie sloistyh sterzhnevnyh sistem*, Fizicheskaja mezomehanika, T. 7, 2004, s. 180-183.
10. PANIN V. E. *Osnovy fizicheskoy mezomehaniki* // Fizicheskaja mezomehanika. - 1998. - T.1, №1. - str. 5-22.
11. PANIN V. E., DERJUGIN E. E., *Samoorganizacija makropolos lokalizovannogo sdviga i fazovye volny pereklyuchenij v polikristallah*, Fizicheskaja mezomehanika, T. 2, nr 1-2, 1999, s. 77-87.
12. PANIN V. E., *Fizicheskie osnovy mezomehaniki sredy so strukturoj*, Izv. VUZov, Fizika, -T. 35, nr 4, 1992, s. 5-18.
13. PANIN V. E., GRINJAEV JU. V., DANILOV V. I. I DR., *Strukturnye urovni plasticheskoy deformacii i razrushenija*, Novosibirsk, Nauka, 1990, s. 255.
14. PANIN V. E., LIHACHEV V. A., GRINJAEV JU. V., *Strukturnye urovni deformacii tverdyh tel*, Novosibirsk, Nauka, 1985, s. 288.
15. PANIN V. E., *Sovremennye problemy plastichnosti i prochnosti tverdyh tel*, Izv. VUZov. Fizika, T. 41, nr 1., 1998, s. 7-34.
16. PANIN V. E., *Volnovaja priroda plasticheskoy deformacii tverdyh tel*, Izv. VUZov, Fizika, T. 22, nr 6, 1990, s. 4-18.
17. PANIN V. E., *Sinergeticheskie principy fizicheskoy mezomehaniki*, Fizicheskaja mezomehanika, T. 2, nr 6, 2000, s. 5-36.
18. BARENBLATT G. I., BOTVINA L. R., *Avtomodelnost' ustalostnogo razrushenija. Nakoplenie povrezhdennosti*, Izv. AN SSSR., Mehanika tverd. Tela., nr 4, 1983, s. 161-165.
19. BETEHTIN V. I., VLADIMIROV V. I., *Kinetika mikrorazrushenija tvjordyh tel*. V kn. Problemy prochnosti i plastichnosti tvjordyh Tel, L.: Nauka, 1979, s. 267
20. FADEENKO JU.I., *Ob uravnenijah dislokacionnoj plastichnosti pri bol'shij deformacijah*, PMTF, 1984, nr 2, s. 138-140.
21. FALK M. L., LANGER J. S., PECHENIK L., *Thermal effects in the sheartransformation-zone theory of amorphous plasticity: Comparisons to metallic glass data*, Physical review E., 2004, no 70, p. 11-507.
22. KONEVA N. A., KOZLOV JE. V., *Fizicheskaja priroda stadijnosti plasticheskoy deformacii .V kn: Strukturnye urovni plasticheskoy deformacii i razrushenija* (pod red. akad.V. E. PANINA), Novosibirsk, Nauka, 1990., S. 123-172.
23. KONEVA N. A., Lychagin S. P., TRISHKONA L. T. AND KOZLOV E. V., In: *Strength of Metals and Alloys, Proceedings of the 7-th International Conference, Montreal. Canada*. Vol. L., 1985, p. 21-27.
24. KONEVA N. A., TEPLJAKOVA L. A., SOSNIN O. V., CELLERMAER V. V., KOVALENKO V. V., *Dislokacionnye substrukturny i ih transformacija pri ustalostnom nagruzhenii (obzor)*, Izvestija vysshijh uchebnyh zavedenij, Fizika, T. 45, nr 3, 2002, s. 87-100.
25. KOZLOV JE. V., STARENCHENKO V. A., KONEVA N. A., *Evoljucija dislokacionnoj substrukturny i termodinamika plasticheskoy deformacii metallicheskih materialov*, Metally, nr 5, 1993, s. 152-161.
26. LIHACHEV V. A., RYBIN V. V., *Rol' plasticheskoy deformacii v processe razrushenija tverdyh tel*, Izv. AN SSSR, Ser. Fiz., T. 37, nr 11, 1973, s. 2433-2438.
27. LIHACHEV V. A., VOLKOV A. E., SHUDEGOV V. E., *Kontinual'naja teorija defektov*, L., Izd-vo Leningr. Univ., 1986, s. 232.

28. RYBIN V. V., *Dislokacionno-disklinacionnye struktury, formirujushhiesja na stadii razvitoj plasticheskoj deformacii*. Voprosy teorii defektov v kristallah. L., 1987, s. 68-84.
29. RYBIN V. V., *Bol'shie plasticheskie deformacii i razrushenie metallov*, M., Metallurgija, 1986, s. 224.
30. RYBIN V. V., MALISHEVSKIJ V. A., OLEJNIK V. N., *Strukturnye prevrashhenija pri plasticheskom deformirovanii dislokacionnogo manrtenzita*, FMM, , T. 42, nr 5, 1976, s.1042-1050.
31. RYBIN V. V., ORLOV A. N., *Teorija podvizhnosti dislokacij v diapazone malyh skorostej*, Fizika tverdogo tela, . Nr 11, 1969, s. 3251-3259.
32. SCHREIER H, ORTEU J. J AND SUTTON M. A., *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications*. Springer US, 2009, p.332.
33. IVANOVA V. S, TERENCEV V. F., *Priroda ustalosti materialov*, M., Metallurgija, 1975, s. 456.
34. VLADIMIROV V. I., *Fizicheskaja priroda razrushenija metallov*, M., Metallurgija, 1984, s. 280.
35. HUTSAYLYUK V., 2016, *Analiza teoretyczna i doświadczalna własności mechanicznych stopów aluminium w warunkach kombinacji różnych obciążeń*, Wojskowa Akademia Techniczna, 258 str.
36. FRIDMAN JA., *Mechanicheskie svojstva metallov. T. 2.*, M., Mashinostroenie, 1974, s. 369.
37. DZH. ZUKAS A., NIKOLAS T., SVIFT H.F. i dr., *Dinamika udara*, M., Mir, 1985, s.296.
38. A. N. ORLOV V., L. INDENBOM, *Debatable Problems in The Physics of Plasticity*, Strength of Metals and Alloys (ICSMA 8), Proceedings of the 8th International Conference On The Strength Of Metals and Alloys Tampere, Finland, 22–26 August 1988 Vol.3, 1989, Pages 1447-1456.

10 kwietnia 2019 r.

Data



Podpis habilitanta