Załącznik nr 3

dr inż. Łukasz Pejkowski

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy

Wydział Inżynierii Mechanicznej
Instytut Mechaniki i Konstrukcji Maszyn
Zakład Metod Komputerowych

Al. Prof. S. Kaliskiego 7
85-796 Bydgoszcz

Autoreferat

przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych, w szczególności określonych na podstawie 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. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311)

Ł. Pejkowski
.....
Podpis wnioskodawcy

dr inż. Łukasz Pęlowski

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy

Wydział Inżynierii Mechanicznej
Instytut Mechaniki i Konstrukcji Maszyn
Zakład Metod Komputerowych

Al. Prof. S. Kaliskiego 7
85-796 Bydgoszcz

Autoreferat

przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych, w szczególności określonych na podstawie 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. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311)

.....
Podpis wnioskodawcy

1. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

Stopień doktora

Rok uzyskania: 2014

Jednostka: Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej

Dyscyplina: Budowa i Eksploatacja Maszyn

Tytuł rozprawy doktorskiej: Model obliczeniowy do szacowania trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń nieproporcjonalnych

Promotor: dr hab. inż. Dariusz Skibicki, prof. nadzw. UTP

Recenzenci:

- prof. dr hab. inż. Tadeusz Łagoda, Politechnika Opolska
- dr hab. inż. Bogdan Ligaj, prof. nadzw. UTP, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy

Tytuł zawodowy magistra inżyniera

Rok uzyskania: 2010

Jednostka: Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej

Kierunek: Mechanika i Budowa Maszyn

Specjalność: Metody Komputerowe w Projektowaniu Układów Mechanicznych

Tytuł pracy magisterskiej: Wizualizacja złożonych stanów naprężeń i odkształceń

Promotor: dr hab. inż. Dariusz Skibicki, prof. nadzw. UTP

2. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

od 03.2015	Adiunkt w Zakładzie Metod Komputerowych, Instytut Mechaniki i Konstrukcji Maszyn, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy
10.2010 – 03.2015	Asystent w Zakładzie Metod Komputerowych, Instytut Mechaniki i Konstrukcji Maszyn, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy

3. Osiągnięcie naukowe, uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora, wynikające 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. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 poz. 1311)

3.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Osiągnięcie naukowe lub artystyczne, uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiące znaczny wkład autora w rozwój określonej dyscypliny naukowej nosi tytuł:

„Niskocyklowa trwałość zmęczeniowa wybranych metali poddanych działaniu wieloosiowych obciążeń asynchronicznych".

Wyżej wymienione dzieło stanowią:

1) Publikacje w czasopismach naukowych:

a) **Pejkowski Ł.**, *On the material's sensitivity to non-proportionality of fatigue loading*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 711-727, 2017

Publikacja z listy A MNiSW, 30 pkt, Impact Factor: 2.763

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: publikacja samodzielna

Szacuję, że mój udział w powstanie pracy wynosi: 100%

b) Skibicki D., **Pejkowski Ł.**, *Low-cycle multiaxial fatigue behaviour and fatigue life prediction for CuZn37 brass using the stress-strain models*, International Journal of Fatigue, Vol. 102, pp. 18-36, 2017

Publikacja z listy A MNiSW, 35 pkt, Impact Factor: 3.132

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: przygotowaniu metodyki badawczej, tj. sposobu wyznaczania naprężeń i odkształceń, przygotowaniu próbek badawczych, wykonaniu badań eksperymentalnych na maszynie wieloosiowej wytrzymałościowej Instron, analizie wyników i sfomułowaniu wniosków, przygotowaniu tekstu manuskryptu.

Szacuję, że mój udział w powstanie pracy wynosi: 40 %

c) Skibicki D., Lipski A., **Pejkowski Ł.**, *Evaluation of plastic strain work and multiaxial fatigue life in CuZn37 alloy by means of thermography method and energy-based approaches of Ellyin and Garud*, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 41, No. 45, pp. 2541-2556, 2018

Publikacja z listy A MNiSW, 30 pkt, Impact Factor: 2.533

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: realizacji badań zmęczeniowych, odpowiedzi na uwagi recenzentów, wprowadzenie zmian i poprawek artykułu.

Szacuję, że mój udział w powstanie pracy wynosi: 30%

d) Karolczuk A., Skibicki D., **Pejkowski Ł.**, Evaluation of the Fatemi-Socie damage parameter for the fatigue life calculation with application of the Chaboche plasticity model, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 42, No. 1, pp. 197-208, 2019

Publikacja z listy A MNiSW, 30 pkt, Impact Factor: 2.533

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na: realizacji badań doświadczalnych i przygotowaniu danych eksperymentalnych do obliczeń.

Szacuję, że mój udział w powstanie pracy wynosi: 20%

2) Monografia (główna część osiągnięcia naukowego):

Pejkowski Ł., Niskocyklowe zachowanie zmęczeniowe wybranych metali poddanych wieloosiowym obciążeniom asynchronicznym, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz, 2019, ISBN 978-83-65603-66-1; Opiniodawca: prof. dr hab. inż. Krzysztof Gołoś, Politechnika Warszawska

3.2. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

3.2.1. Wprowadzenie

Zmęczenie materiałów i obiektów inżynierskich jest istotnym problemem konstrukcyjnym i eksploatacyjnym. Zjawisko to polega na stopniowej degradacji elementów konstrukcji mechanicznych, wynikającej z cyklicznie powtarzającego się obciążenia. Wystąpienie zmiennych w czasie, powtarzających się obciążeń, którym poddane są elementy maszyn i konstrukcji, jest częstokroć niemożliwe do uniknięcia, ponieważ wynika z naturalnych warunków eksploatacji. Mimo, że od wielu lat prowadzone są badania w zakresie zmęczenia materiałów, to zjawisko to wciąż nie jest w pełni poznane. Kontynuacja badań na temat tej problematyki jest konieczna, ponieważ mimo, iż uszkodzenia czy awarie elementów mechanicznych spowodowane zmęczeniem materiałów występują stosunkowo rzadko, to ich skutki mają zwykle charakter katastrofalny. Ciągłe dążenie do poprawy bezpieczeństwa użytkowania obiektów inżynierskich oraz do obniżenia kosztów ich produkcji i eksploatacji powoduje, że wciąż poszukiwane są metody dokładniejszego prognozowania zachowania zmęczeniowego materiałów. Prowadzone są także badania eksperymentalne mające na celu dostarczenie nowej wiedzy.

Zmęczenie materiałów jest zjawiskiem złożonym, na które wpływ ma wiele czynników, takich jak: wykończenie powierzchni, gabaryty danego elementu (efekt skali), spiętrzenie naprężeń spowodowane nieciągłościami geometrycznymi i strukturalnymi, wartość średnia naprężenia, wpływ środowiska, temperatura czy typ obciążenia. Pewną grupę obciążeń, które mają bardzo istotny wpływ na zachowanie zmęczeniowe materiałów, stanowią obciążenia wieloosiowe, w tym szczególnie nieproporcjonalne. Nazywane są tak obciążenia, które powodują zmianę położenia osi głównych naprężeń i odkształceń w trakcie realizacji cyklu lub bloku obciążenia. Pod wpływem obciążeń nieproporcjonalnych większość materiałów metalicznych wykazuje odmienne zachowanie zmęczeniowe niż w warunkach obciążeń

proporcjonalnych. W zakresie zmęczenia niskocyklowego występuje zjawisko dodatkowego cyklicznego umocnienia nieproporcjonalnego. Jego objawem są wyższe wartości rejestrowanych naprężeń, w porównaniu do obciążenia proporcjonalnego o tym samym zakresie odkształceń lub maksymalnej wartości odkształcenia ekwiwalentnego według hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego (HMH). Zarówno dla zakresu zmęczenia nisko- jak i wysokocyklowego, w przypadku obciążeń nieproporcjonalnych obserwuje się najczęściej obniżenie trwałości zmęczeniowej, w stosunku do obciążeń proporcjonalnych o zbliżonych wartościach parametrów zniszczenia, dedykowanych do opisu zmęczenia wieloosiowego. Materiały poddane działaniu obciążeń nieproporcjonalnych wykazują trwałości zmęczeniowe nierzadko nawet kilkukrotnie niższe niż w warunkach obciążeń proporcjonalnych. Również przełomy zmęczeniowe oraz mikrostruktura materiałów pod wpływem działania obciążeń nieproporcjonalnych wskazują na złożony charakter obciążeń tego typu.

Modelowanie zachowania zmęczeniowego materiałów poddanych obciążeniom nieproporcjonalnym jest skomplikowane. Opisywane w literaturze metody modelowania często są skuteczne wyłącznie dla wąskiej grupy przypadków obciążeń wieloosiowych lub materiałów. Z tego powodu wciąż prowadzone są prace teoretyczne nad nowymi modelami, ale także badania eksperymentalne mające na celu poszerzenie wiedzy. Historycznie największą grupę obciążeń nieproporcjonalnych, z wykorzystaniem których prowadzono badania zmęczeniowe, stanowią obciążenia z przesunięciem fazowym składowych (*out-of-phase*). W przypadku tego typu obciążeń, parametrem, który decyduje o stopniu nieproporcjonalności, jest kąt przesunięcia fazowego. Jednak jest on stały w czasie, podobnie jak amplitudy składowych. Stosunek częstotliwości składowych także jest stały i równy jest jedności. Wyniki badań zmęczeniowych realizowanych z wykorzystaniem obciążeń z przesunięciem fazowym składowych dostarczyły bardzo ważnej i podstawowej wiedzy na temat zachowania materiałów w warunkach obciążeń nieproporcjonalnych. Dzięki nim sformułowane zostały także podstawowe modele. Jednakże wraz z rozwojem stanu wiedzy oraz możliwości aparatury badawczej dostrzega się potrzebę prowadzenia badań z zastosowaniem bardziej skomplikowanych obciążeń. Jednym z kierunków prowadzonych prac jest badanie zachowania zmęczeniowego materiałów oraz testowanie opisywanych w literaturze modeli przy wykorzystaniu obciążeń wieloosiowych o parametrach, które powodują, że prognozowanie trwałości zmęczeniowej, czy odpowiedzi naprężeniowo-odkształceniowej jest szczególnie utrudnione.

3.2.2. Geneza pracy

Od początku swojej działalności naukowej zajmowałem się głównie problematyką zmęczenia wieloosiowego. Szczególną uwagę poświęciłem badaniu trwałości zmęczeniowej materiałów metalicznych poddanych działaniu obciążeń nieproporcjonalnych. Jednym z kierunków badań prowadzonych w tym zakresie jest poznanie zachowania zmęczeniowego materiałów oraz weryfikowanie istniejących lub formułowanie nowych modeli, dla jak najszerszego spektrum przypadków obciążenia. Analizując źródła literaturowe, zauważyłem, że znaczna część prac poświęconych obciążeniom nieproporcjonalnym dotyczy głównie obciążeń z przesunięciem fazowym składowych. Z drugiej strony istnieje pewna grupa publikacji, w których skupiono się wyłącznie na obciążeniach losowych. Natomiast liczba prac, w których stosowane są obciążenia deterministyczne, lecz inne niż z przesunięciem fazowym składowych jest bardzo ograniczona. Wskazują one jednak, że wyniki uzyskane przy użyciu

tego typu obciążeń stanowią cenny zbiór danych z punktu widzenia testowania modeli zmęczenia wieloosiowego oraz poznawania zachowania zmęczeniowego materiałów.

W artykule pt. „On the material's sensitivity to non-proportionality of fatigue loading" (podpunkt 3.1, pozycja 1) a), dokonano przeglądu stanu wiedzy literaturowej na temat wyników badań eksperymentalnych w zakresie obciążeń nieproporcjonalnych. Analizie poddano wyniki dotyczące cyklicznego umocnienia i trwałości zmęczeniowej materiałów w warunkach zmęczenia niskocyklowego oraz trwałości i wytrzymałości zmęczeniowej w zakresie zmęczenia wysokocyklowego. Przeprowadzono także analizę wybranych modeli zmęczenia wieloosiowego, w których uwzględnia się wpływ nieproporcjonalności obciążenia na trwałość zmęczeniową. Na podstawie wykonanej pracy stwierdzono, że w literaturze nie ma powszechnie przyjętej definicji stopnia nieproporcjonalności obciążenia oraz metod jej opisu. Autorzy niektórych publikacji wskazują, że pewne obciążenia muszą być „intuicyjnie" bardziej nieproporcjonalne od innych, ponieważ zróżnicowany jest ich wpływ na proces niszczenia materiału. W innej grupie prac stopień nieproporcjonalności obciążenia w ogóle nie jest dyskutowany. Podobnie, istnieją zróżnicowane podejścia do wrażliwości materiału na nieproporcjonalność obciążenia. Najczęściej próbuje wiązać się ją z dodatkowym umocnieniem nieproporcjonalnym. Zjawisko to polega na występowaniu wyższych wartości naprężeń w przypadku obciążeń nieproporcjonalnych niż dla obciążeń proporcjonalnych, przy tym samym poziomie odkształcenia. Jednak występuje pewna grupa materiałów, która nie wykazuje istotnego umocnienia nieproporcjonalnego, a ich trwałość zmęczeniowa pod wpływem obciążeń nieproporcjonalnych jest znacznie obniżona. Także w zakresie zmęczenia wysokocyklowego, gdzie dominują odkształcenia sprężyste, umocnienie nieproporcjonalne nie zachodzi, a wpływ nieproporcjonalności obciążenia na trwałość zmęczeniową jest bardzo istotny. Zauważono również, że nieproporcjonalność obciążenia oraz jej stopień zależą nie tylko od kąta przesunięcia fazowego pomiędzy przebiegami odkształceń i naprężeń składowych, co najczęściej opisywane i dyskutowane jest w literaturze. Istotny wpływ na stopień nieproporcjonalności obciążenia ma także stosunek częstotliwości odkształceń i naprężeń składowych oraz stosunek ich amplitud. Realizując wyżej opisaną pracę stwierdzono, że zachodzi potrzeba prowadzenia badań zmęczeniowych z zastosowaniem obciążeń o zróżnicowanym stopniu nieproporcjonalności oraz wykorzystując wyniki tych badań, testowania istniejących w literaturze modeli w zakresie prognozowania trwałości zmęczeniowej.

Wnioski te posłużyły do sformułowania programu badań, których wyniki opublikowano w artykule „Low-cycle multiaxial fatigue behaviour and fatigue life prediction for CuZn37 brass using the stress-strain models" (podpunkt 3.1, pozycja 1) b). W pracy tej przeprowadzono niskocyklowe badania zmęczeniowe sterowane odkształceniem na mosiądzu CuZn37. Materiał ten charakteryzuje się niską wartością energii błędu ułożenia, z którą wiąże się wrażliwość materiału na nieproporcjonalność obciążenia. Spodziewano się zatem, że zjawiska spowodowane przez obciążenia nieproporcjonalne będą szczególnie intensywne. Zastosowano 8 przypadków obciążenia, w tym 5 nieproporcjonalnych. Pierwszym z zastosowanych obciążeń nieproporcjonalnych było obciążenie z przesunięciem fazowym składowych o przebiegach sinusoidalnych wynoszącym 90°. Jest to przypadek obciążenia najczęściej analizowany w literaturze, często traktowany jako najbardziej nieproporcjonalny. Dwa kolejne przypadki obciążenia charakteryzowały się różnymi wartościami częstotliwości odkształceń składowych. Następnie zastosowano obciążenia o trójkątnym przebiegu odkształceń składowych. Zakładano, że wybrane przypadki obciążeń różnią się stopniem nieproporcjonalności oraz innymi cechami i w związku z tym, należy spodziewać się odmiennej odpowiedzi materiału.

Przypuszczenia te zostały potwierdzone przez wyniki badań eksperymentalnych. Materiał wykazał wysoki stopień umocnienia nieproporcjonalnego, które jednocześnie różniło się w zależności od przypadku obciążenia. Podobnie, zaobserwowano znaczny i zróżnicowany wpływ zastosowanych obciążeń na trwałość zmęczeniową materiału. Ponadto, przeprowadzono analizę kształtu pętli histerezy oraz ich energii, a także zrealizowano porównanie wyników szacowania trwałości zmęczeniowej z wykorzystaniem wybranych, często stosowanych w literaturze, modeli. Zauważono, że bardzo dobre wyniki prognozowania trwałości uzyskano stosując modele naprężeniowo-odkształceniowe: energetyczne oraz model Fatemiego-Sociego, reprezentujący podejście płaszczyzny krytycznej. Praktyczne zastosowanie tych modeli wymaga modelowania cyklicznego odkształcenia sprężysto-plastycznego lub pomiarów umożliwiających wyznaczenie wartości naprężeń i odkształceń (lub energii odkształcenia). Wyciągnięte wnioski stanowiły podstawę do prowadzenia kolejnych prac.

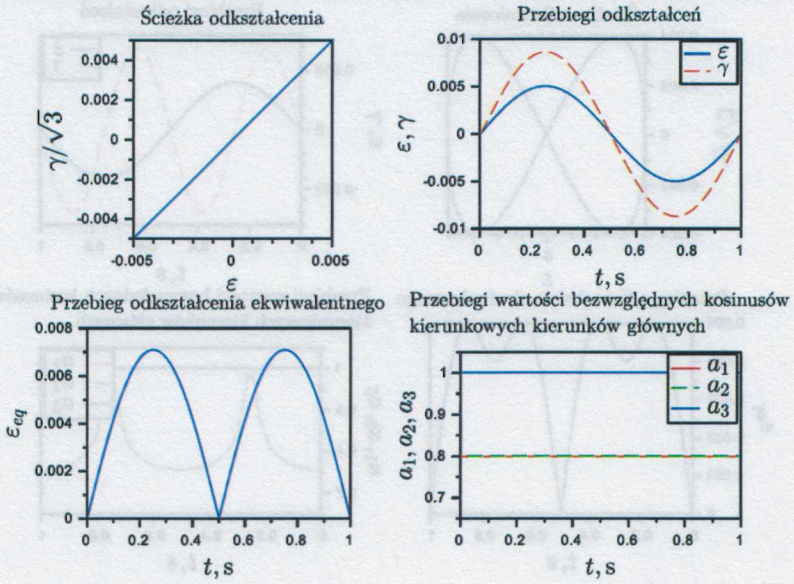
Realizując badania eksperymentalne na mosiądzu CuZn37, powierzchnię próbek obserwowano za pomocą kamery termograficznej CEDIP Silver 420 M (FLIR SC5200). W artykule pt. „Evaluation of plastic strain work and multiaxial fatigue life in CuZn37 alloy by means of thermography method and energy-based approaches of Ellyin and Garud" (podpunkt 3.1, pozycja 1) c), podjęto próbę wyznaczania gęstości energii odkształcenia na podstawie pomiarów termograficznych. Wykazano, że analiza termograficzna pozwoliła na bardzo precyzyjne wyznaczenie wartości energii odkształcenia plastycznego, zarówno w przypadku obciążeń jednoosiowych jak i wieloosiowych proporcjonalnych i nieproporcjonalnych. Wyznaczoną na podstawie analiz termograficznych energię zastosowano do szacowania trwałości zmęczeniowej, wykorzystując modele energetyczne. Uzyskano satysfakcjonujące rezultaty.

W publikacji pt. „Evaluation of the Fatemi-Socie damage parameter for the fatigue life calculation with application of the Chaboche plasticity model" (podpunkt 3.1, pozycja 1) d), zastosowano model umocnienia kinematycznego Chaboche'a w celu wyznaczenia wartości naprężeń w warunkach wcześniej omówionych przypadków obciążenia. Do kalibracji i weryfikacji modelu użyto wyników eksperymentów przeprowadzonych uprzednio na próbkach wykonanych z mosiądzu CuZn37. Obliczone wartości naprężeń zastosowano do szacowania trwałości zmęczeniowej przy użyciu modelu Fatemieg-Sociego. Wykazano, między innymi, że zastosowanie modelu umocnienia kinematycznego Chboche'a, z pominięciem umocnienia nieproporcjonalnego, umożliwiło wyznaczenie wartości naprężeń różniących się od eksperymentalnych o około 30%. W konsekwencji szacowane trwałości zmęczeniowe były zawyżone w stosunku do eksperymentalnych, lecz akceptowalne.

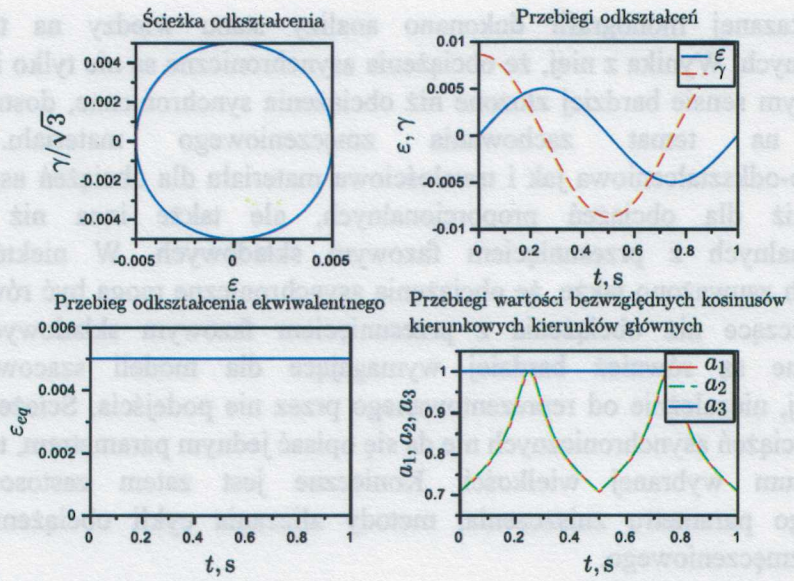
W trakcie realizacji wszystkich wyżej omówionych badań szczególną uwagę zwróciłem na grupę obciążeń, w przypadku których występowała różnica w wartości częstotliwości przebiegów odkształceń składowych. W literaturze obciążenia takie nazywane są zwykle asynchronicznymi. W porównaniu do innych przypadków obciążeń wieloosiowych, wyniki badań zmęczeniowych prowadzonych z zastosowaniem obciążeń asynchronicznych publikowane są w literaturze stosunkowo rzadko. Najczęściej używany jest jeden rodzaj obciążenia asynchronicznego jako jeden z wielu rodzajów analizowanych obciążeń wieloosiowych i nie poświęca mu się szczególnej uwagi. Ponadto, najczęściej stosowanym przypadkiem obciążenia asynchronicznego jest taki, w którym stosunek częstotliwości f_γ/f_ε wynosi 2 lub 0,5. W większości prac nie porusza się także problemu definicji cyklu obciążenia, która dla obciążeń asynchronicznych nie jest jednoznaczna. Na ogół przyjmuje się arbitralnie,

bez uzasadnienia, że liczba cykli obciążenia asynchronicznego równa jest liczbie powtórzeń ścieżki obciążenia. Jednocześnie obciążenie takie opisywane bywa takim samym parametrem zniszczenia jak obciążenia synchroniczne. W przypadkach, gdy różnica w częstotliwościach odkształceń lub naprężeń składowych jest znaczna, podejście takie prowadzi do wątpliwości dotyczących interpretacji uzyskanych wyników. Na podstawie powyższych obserwacji uznałem, że celowym jest prowadzenie badań w zakresie obciążeń asynchronicznych, z zastosowaniem szerokiego spektrum przypadków obciążenia a także na dużej liczbie materiałów. Na podstawie takich danych możliwe jest podjęcie próby wyciągnięcia wniosków ogólnych. Skłoniło mnie to do złożenia wniosku o finansowanie projektu badawczego w ramach konkursu Miniatura organizowanego przez Narodowe Centrum Nauki. Projekt został zakwalifikowany do finansowania. W trakcie jego realizacji uzyskano bardzo dużą liczbę danych. Uznałem, że właściwą formą ich publikacji jest monografia, którą wskazano jako główną część osiągnięcia habilitacyjnego w podpunkcie 3.1, pozycja 2).

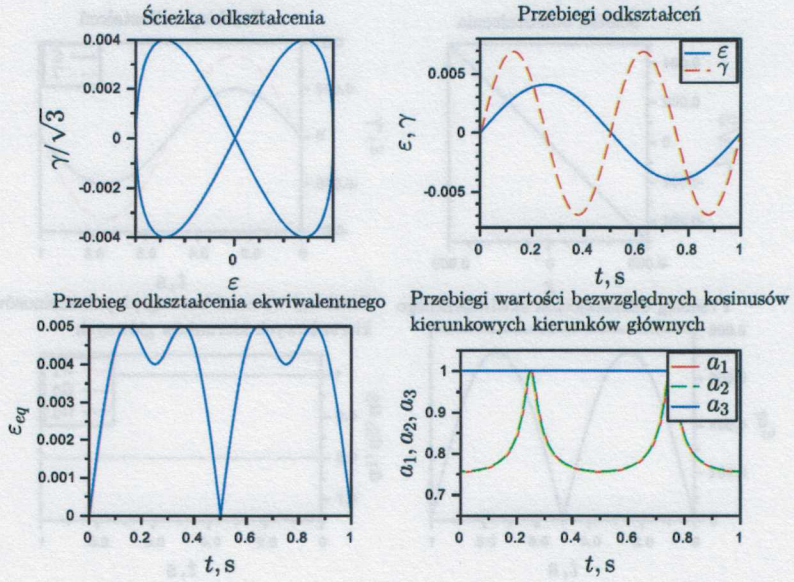
Aby w podstawowy sposób scharakteryzować obciążenia asynchroniczne na rys. 1 - rys. 3 porównano ścieżki odkształcenia, przebiegi czasowe odkształceń składowych, odkształcenia ekwiwalentnego według hipotezy HMH oraz wartości bezwzględnych kosinusów kierunkowych osi głównych dla 3 wybranych przypadków obciążenia. Obciążenia te scharakteryzowane zostały za pomocą trzech parametrów: stosunku amplitud odkształceń składowych λ, kąta przesunięcia fazowego δ i stosunku częstotliwości odkształceń składowych f_γ/f_ε. Dla wszystkich przykładowych obciążeń $\lambda = \sqrt{3}$, dla obciążenia proporcjonalnego $\delta = 0°$, $f_\gamma/f_\varepsilon = 1$, dla obciążenia z przesunięciem fazowym składowych $\delta = 90°$, $f_\gamma/f_\varepsilon = 1$, a dla obciążenia asynchronicznego $\delta = 0°$, $f_\gamma/f_\varepsilon = 2$. Zaobserwować można, że obciążenie proporcjonalne charakteryzuje prostoliniowa ścieżka obciążenia oraz stałe wartości bezwzględne kosinusów kierunkowych układu głównego. W przypadku obciążenia z przesunięciem fazowym składowych oraz obciążenia asynchronicznego, ścieżki odkształcenia znacząco odbiegają od linii prostej, a zmiany wartości bezwzględnych kosinusów kierunkowych wskazują na stały obrót osi głównych. Świadczy to o znacznym stopniu nieproporcjonalności tych obciążeń. Jednocześnie przebieg wartości odkształcenia ekwiwalentnego oraz wartości bezwzględnych kosinusów kierunkowych układu głównego dla obciążenia z przesunięciem składowych oraz obciążenia asynchronicznego jest odmienny. Zakładać zatem należy, że stopień nieproporcjonalności, a co za tym idzie, wpływ na zachowanie zmęczeniowe materiałów, powinien być dla tych dwóch rodzajów obciążenia również różny.



Rys. 1. Przebiegi wybranych wielkości opisujących obciążenie proporcjonalne; $\delta = 0°$, $\lambda = \sqrt{3}$, $f_\gamma / f_\varepsilon = 1$



Rys. 2. Przebiegi wybranych wielkości opisujących obciążenie nieproporcjonalne z przesunięciem fazowym składowych; $\delta = 90°$, $\lambda = \sqrt{3}$, $f_\gamma / f_\varepsilon = 1$



Rys. 3. Przebiegi wybranych wielkości opisujących obciążenie asynchroniczne; $\delta = 0°$, $\lambda = \sqrt{3}$, $f_\gamma / f_\varepsilon = 2$

We wskazanej monografii dokonano analizy stanu wiedzy na temat obciążeń asynchronicznych. Wynika z niej, że obciążenia asynchroniczne są nie tylko interesujące, ale jako w pewnym sensie bardziej złożone niż obciążenia synchroniczne, dostarczają cennych informacji na temat zachowania zmęczeniowego materiału. Odpowiedź naprężeniowo-odkształceniowa jak i trwałościowa materiału dla obciążeń asynchronicznych jest inna niż dla obciążeń proporcjonalnych, ale także inna niż dla obciążeń nieproporcjonalnych z przesunięciem fazowym składowych. W niektórych źródłach literaturowych zauważono także, że obciążenia asynchroniczne mogą być równie, lub nawet bardziej niszczące niż obciążenia z przesunięciem fazowym składowych. Obciążenia asynchroniczne są również bardziej wymagające dla modeli szacowania trwałości zmęczeniowej, niezależnie od reprezentowanego przez nie podejścia. Ścieżek obciążenia w przypadku obciążeń asynchronicznych nie da się opisać jednym parametrem, takim jak zakres czy maksimum wybranej wielkości. Konieczne jest zatem zastosowanie, oprócz odpowiedniego parametru zniszczenia, metody zliczania cykli obciążenia i kumulacji uszkodzenia zmęczeniowego.

3.2.3. Cel pracy

Celem naukowym wskazanej monografii było zbadanie zachowania zmęczeniowego wybranych materiałów metalicznych poddanych zmęczeniowym, wieloosiowym obciążeniom asynchronicznym, w zakresie małej liczby cykli. Wyznaczono trwałość zmęczeniową cienkościennych próbek cylindrycznych. Zbadana została także odpowiedź naprężeniowo-odkształceniowa materiałów w cyklu obciążenia, a także jej zmiany w trakcie przebiegu prób zmęczeniowych. Ponadto dokonano obserwacji i analizy zdjęć mikroskopowych pęknięć zmęczeniowych na powierzchniach próbek.

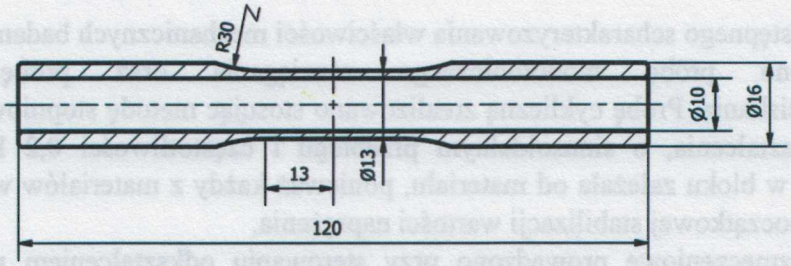
Celem dodatkowym było sprawdzenie możliwości modelowania zachowania zmęczeniowego materiałów za pomocą najpopularniejszych modeli opisywanych w literaturze.

Podjęto próbę modelowania odkształcenia sprężysto-plastycznego z wykorzystaniem metody elementów skończonych oraz prognozowania trwałości zmęczeniowej.

3.2.4. Materiały i metody

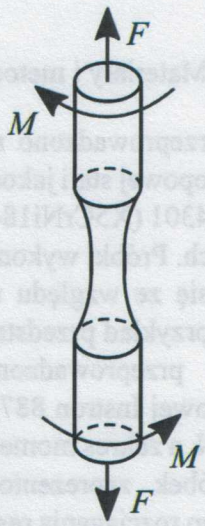
Badania przeprowadzono na czterech materiałach: stopie aluminium PA38 (AW-6060, AlMgSi), niestopowej stali jakościowej E235 (1.0308) i E355 (1.0580) oraz austenitycznej stali nierdzewnej 1.4301 (X5CrNi18-10, 304). Materiały zostały zakupione w postaci bezszwowych rur precyzyjnych. Próbki wykonano przez obróbkę skrawaniem na tokarce CNC. Ich geometria nieco różniła się ze względu na odmienne wymiary profili, z których zostały wykonane. Na rys. 4 jako przykład przedstawiono wymiary próbki wykonanej ze stopu aluminium PA38.

Badania przeprowadzono na serwohydraulicznej, dwuosiowej maszynie wytrzymałościowej Instron 8874. Zakres możliwej do uzyskania na tej maszynie siły osiowej wynosi ± 25 kN, a zakres momentu skręcającego ±100 Nm. Stanowisko do badań oraz schemat obciążenia próbek zaprezentowano na rys. 5. Pomiar odkształcenia w trakcie próby monotonicznego rozciągania realizowany był za pomocą jednoosiowego ekstensometru Instron o bazie pomiarowej wynoszącej 12,5 mm i zakresie pomiarowym ± 5 mm. Wszystkie badania zmęczeniowe przeprowadzono z wykorzystaniem ekstensometru dwuosiowego Epsilon 3550. Baza pomiarowa tego ekstensometru wynosi 10 mm, zakres pomiarowy odkształcenia osiowego ± 1 mm, a odkształcenia postaciowego ± 2°.



Rys. 4. Wymiary próbki cienkościennej wykonanej ze stopu aluminium PA38

a) b)

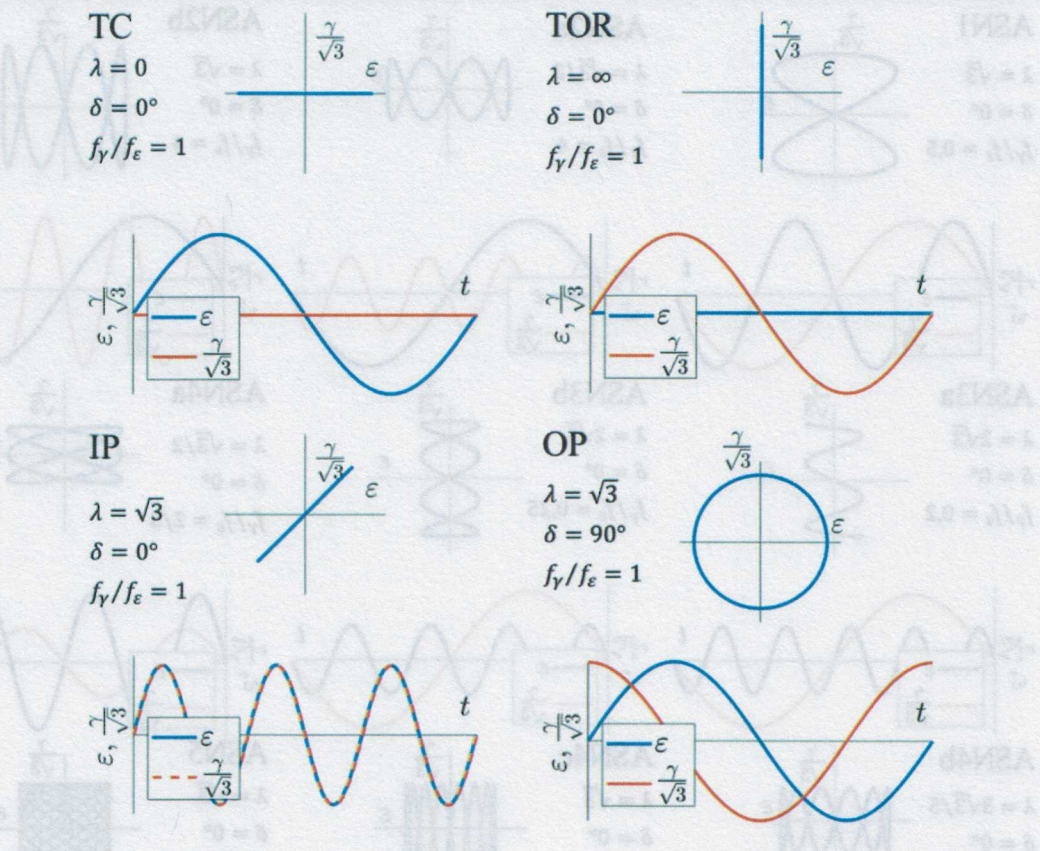


Rys. 5. Stanowisko do badań zmęczeniowych: a) maszyna wytrzymałościowa Instron 8874, b) schemat obciążenia próbki

W celu wstępnego scharakteryzowania właściwości mechanicznych badanych materiałów przeprowadzono próbę monotonicznego rozciągania oraz próbę cyklicznego rozciągania-ściskania. Próbę cykliczną zrealizowano stosując metodę stopniowego narastania poziomu odkształcenia, o sinusoidalnym przebiegu i częstotliwości 0,2 Hz. Ilość cykli odkształcenia w bloku zależała od materiału, ponieważ każdy z materiałów wykazywał inny czas trwania początkowej stabilizacji wartości naprężenia.

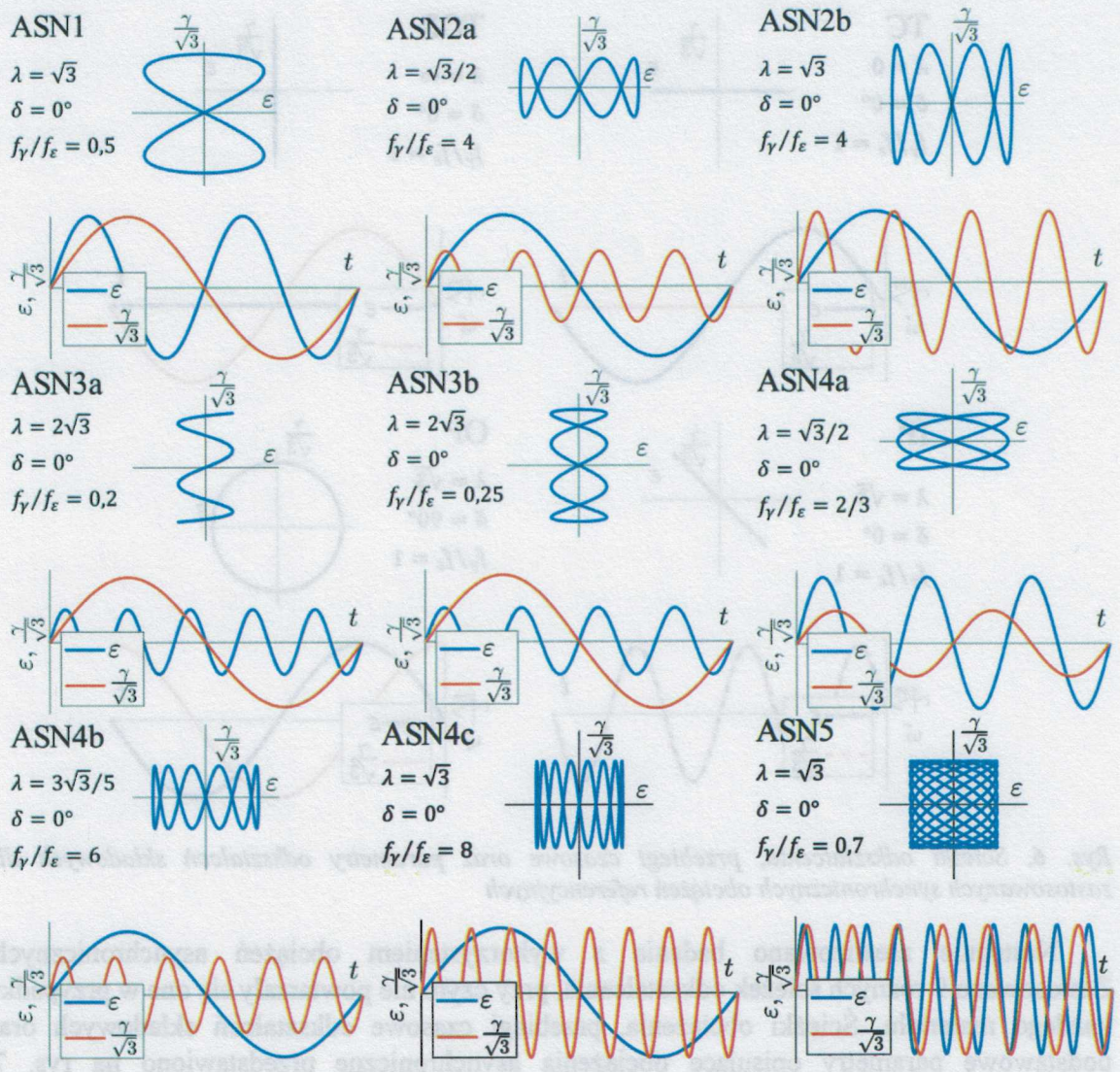
Badania zmęczeniowe prowadzono przy sterowaniu odkształceniem normalnym ε i postaciowym γ. W celu eliminacji wpływu prędkości odkształcenia na zachowanie materiału, częstotliwość prób zmęczeniowych dobierano tak, aby prędkość odkształcenia ekwiwalentnego wg hipotezy HMH wynosiła $\dot{\varepsilon}_{eq} < 0{,}001\ \mathrm{s}^{-1}$. Zastosowano sinusoidalne, wahadłowe przebiegi odkształceń składowych.

Dla wszystkich materiałów przyjęto 4 referencyjne przypadki obciążeń synchronicznych: rozciąganie-ściskanie (TC), skręcanie (TOR), obciążenie proporcjonalne, o stosunku amplitudy odkształcenia postaciowego do normalnego wynoszącym $\lambda = \sqrt{3}$ (IP) oraz obciążenie nieproporcjonalne z przesunięciem fazowym składowych $\delta = 90°$ (OP) i $\lambda = \sqrt{3}$. Ścieżki obciążenia i przebiegi odkształceń składowych dla wyżej wymienionych obciążeń zilustrowano na rys. 6.



Rys. 6. Ścieżki odkształcenia, przebiegi czasowe oraz parametry odkształceń składowych dla zastosowanych synchronicznych obciążeń referencyjnych

Następnie zrealizowano badania z wykorzystaniem obciążeń asynchronicznych. Zastosowano 9 różnych ścieżek odkształcenia, przy czym nie powtarzały się one w przypadku każdego materiału. Ścieżki obciążenia, przebiegi czasowe odkształceń składowych oraz podstawowe parametry opisujące obciążenia asynchroniczne przedstawiono na rys. 7. Zestawienie rodzajów obciążeń asynchronicznych zastosowanych w przypadku poszczególnych materiałów przedstawiono w tabeli 1. Dobór parametrów obciążeń asynchronicznych, a w szczególności stosunku amplitud λ i stosunku częstotliwości f_γ/f_ε dokonywany był w taki sposób, aby zróżnicowany był udział składowych normalnych i stycznych w ramach danego przypadku obciążenia. Udział ten rozumiany był jako różna liczba cykli oraz zakładany, dominujący udział jednej składowej w sumarycznej wartości pracy sił zewnętrznych.



Rys. 7. Ścieżki odkształcenia, przebiegi czasowe oraz parametry odkształceń składowych dla zastosowanych obciążeń asynchronicznych

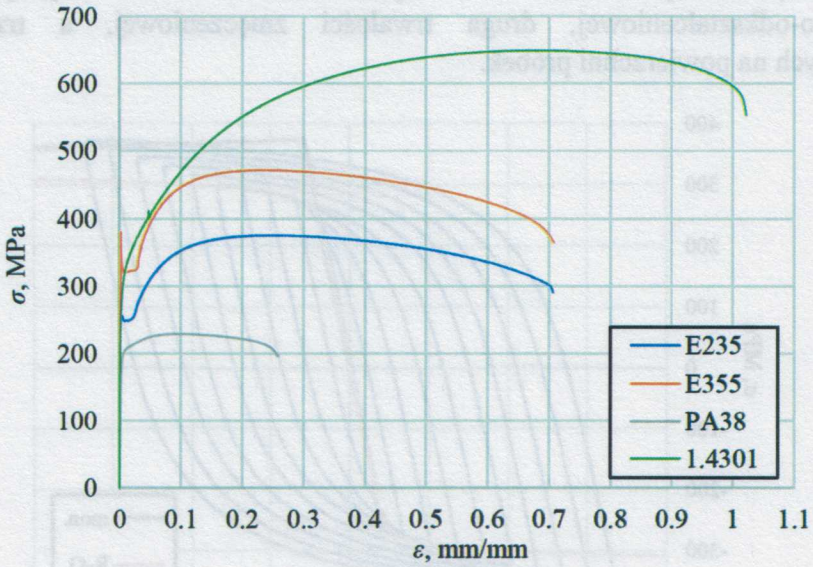
Tabela 1. Zastosowane rodzaje obciążeń asynchronicznych dla poszczególnych materiałów

Materiał	Rodzaj obciążenia				
PA38	ASN1	ASN2a	ASN3a	ASN4c	ASN5
E235	ASN1	ASN2a	ASN3b	ASN4a	
E355	ASN1	ASN2b	ASN3b	ASN4b	ASN5
1.4301	ASN1	ASN2a	ASN3a	ASN4b	ASN5

3.2.5. Wyniki badań

Na podstawie wyników prób monotonicznego rozciągania wyznaczono moduł Younga, granicę plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie, parametry równania Ramberga-Osgooda oraz odkształcenie przy największej sile. Wykresy monotonicznego rozciągania przedstawiono

na rys. 8. Uzyskane wyniki wskazują, że badane materiały różnią się istotnie właściwościami wytrzymałościowymi. Znaczące różnice występują także w ciągliwości materiałów.

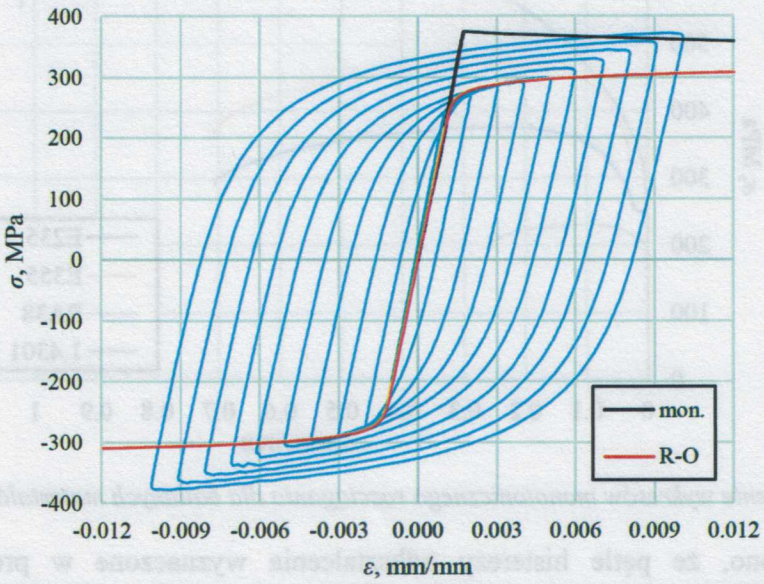


Rys. 8. Zestawienie wykresów monotonicznego rozciągania dla badanych materiałów

Stwierdzono, że pętle histerezy odkształcenia wyznaczone w próbie cyklicznego rozciągania-ściskania dla stopu aluminium PA38 wykazywały w przybliżeniu zachowanie podlegające opisowi modelem Masinga, tj. ich gałęzie w pewnym zakresie pokrywały się. Natomiast dla zbadanych gatunków stali zaobserwowano zachowanie pętli histerezy niezgodne z modelem Masinga. Ponadto, w przypadku stali E235 i E355 wystąpiło zjawisko zmiany odpowiedzi odkształceniowo-naprężeniowej ze zgodnej na niezgodną z modelem Masinga. Dla przykładu, na rys. 9 zaprezentowano pętle histerezy wyznaczone dla stali E355 w próbie cyklicznego rozciągania-ściskania, wraz z naniesioną krzywą Ramberga-Osgooda, wyznaczoną dla pętli histerezy podlegających opisowi modelem Masinga oraz fragmentem wykresu monotonicznego rozciągania. Wyniki uzyskane dla pozostałych materiałów zaprezentowano w monografii. W przypadku stopu aluminium PA38 i stali 1.4301, które nie wykazały wyraźnej granicy plastyczności, zaobserwowano umocnienie cykliczne. Natomiast na wykresie monotonicznego rozciągania stali E235 i E355 widoczny jest przystanek plastyczności, przez co trudno jednoznacznie stwierdzić, czy materiał umacniał się lub osłabiał cyklicznie. Na podstawie danych uzyskanych dla stopu aluminium PA38 wyznaczono parametry równania Ramberga-Osgooda, natomiast do opisu zależności pomiędzy naprężeniem i odkształceniem dla pozostałych materiałów, których zachowanie było niezgodne z modelem Masinga, zastosowano tzw. krzywą szkieletową.

W dalszej kolejności przeprowadzone zostały pełne próby zmęczeniowe, realizowane do zniszczenia próbek. Za kryterium zniszczenia próbki przyjęto gwałtowną zmianę wartości naprężenia ekwiwalentnego, najczęściej spadek. Zmiana taka była tożsama z gwałtownym przyrostem długości pęknięcia zmęczeniowego. W przypadkach, w których w końcowym okresie trwałości próbki spadek naprężenia był łagodny, za kryterium zniszczenia przyjęto spadek naprężenia o ok. 10% w stosunku do wartości z przedziału odpowiadającego w przybliżeniu połowie trwałości. W przypadku wszystkich badań zmęczeniowych rejestrowano 100 próbek sygnałów odkształceń, siły, momentu skręcającego oraz przemieszczenia liniowego i kątowego, na 1 cykl sygnału o niższej częstotliwości. Skutkiem tego każda zapisana pętla

histerezy składała się z minimum około 100 punktów. Dane zapisywano w trybie ciągłym, tzn. zarejestrowano każdy cykl obciążenia od rozpoczęcia próby, aż do zniszczenia próbki. Analizę uzyskanych wyników podzielono na 3 części. Pierwsza z nich dotyczyła odpowiedzi naprężeniowo-odkształceniowej, druga trwałości zmęczeniowej, a trzecia pęknięć zmęczeniowych na powierzchni próbek.

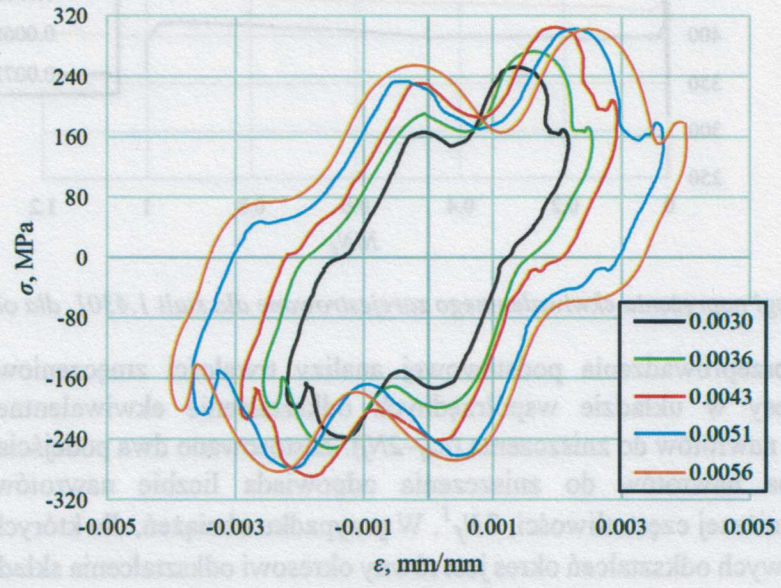


Rys. 9. Pętle histerezy zarejestrowane dla stali E355 metodą stopniowego zwiększania poziomu odkształcenia; mon. – wykres monotonicznego rozciągania, R-O – krzywa Ramberga-Osgooda

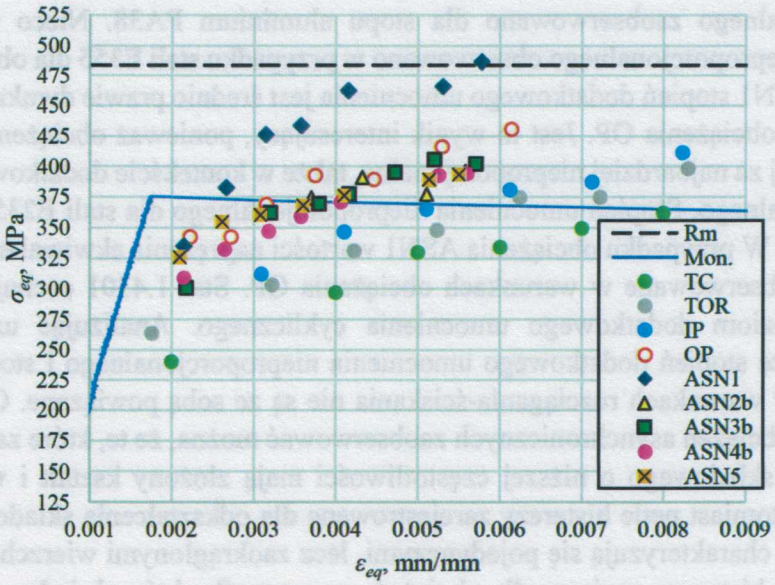
W ramach badania odpowiedzi naprężeniowo-odkształceniowej materiałów, dla każdego z zastosowanych rodzajów obciążenia dokonano analizy pętli histerezy wybranych ze środka trwałości zmęczeniowej próbek, umocnienia cyklicznego oraz zmian wartości naprężenia ekwiwalentnego według hipotezy HMH w trakcie testów zmęczeniowych. Przykład zarejestrowanych pętli histerezy zaprezentowano na rys. 10. Są to pętle histerezy odkształcenia normalnego, przedstawione w układzie odkształcenie-naprężenie inżynierskie, wyznaczone dla stali E355, poddanej obciążeniu asynchronicznemu ASN2b. Na rys. 11 zaprezentowano dla przykładu wykres cyklicznego umocnienia stali E355. Współrzędne naniesionych na wykres punktów odpowiadają maksymalnym w czasie wartościom ekwiwalentnych naprężeń i odkształceń. Wykreślono także fragment wykresu monotonicznego rozciągania i zaznaczono wartość wytrzymałości na rozciąganie. Przykład przebiegów czasowych odkształcenia ekwiwalentnego przedstawiono na rys. 12. Zarejestrowano je dla stali 1.4301, poddanej obciążeniu ASN3a. Wymienione powyżej wykresy oraz ich omówienie zostało zamieszczone w monografii dla wszystkich zastosowanych materiałów oraz przypadków i poziomów obciążenia.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że w przypadku rozciągania-ściskania najniższe wartości naprężenia zaobserwowano dla stopu aluminium PA38. Stal E235 wykazała najniższe wartości naprężeń spośród badanych stali, a stal E355 najwyższe. Naprężenia w przypadku stali 1.4301, w badanym zakresie odkształceń, miały wartości pomiędzy obserwowanymi dla stali E235 i E355, lecz ich przyrost wraz ze wzrostem poziomu odkształcenia był największy. W przypadku wszystkich materiałów poddanych badaniom wystąpiło zjawisko dodatkowego umocnienia cyklicznego. Zaobserwowano je dla wszystkich przypadków obciążeń nieproporcjonalnych. Najniższy poziom umocnienia

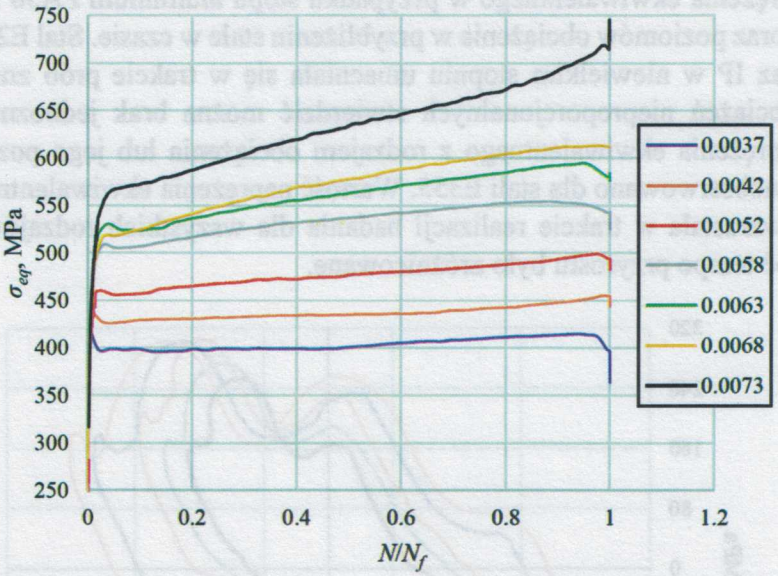
nieproporcjonalnego zaobserwowano dla stopu aluminium PA38. Nieco większy poziom umocnienia nieproporcjonalnego obserwowano w przypadku stali E355 dla obciążenia OP. Dla obciążenia ASN1 stopień dodatkowego umocnienia jest średnio prawie dwukrotnie wyższy niż w warunkach obciążenia OP. Jest to wynik interesujący, ponieważ obciążenie OP uznawane jest najczęściej za najbardziej nieproporcjonalne, także w kontekście dodatkowego umocnienia nieproporcjonalnego. Stopień umocnienia nieproporcjonalnego dla stali E235 jest wyższy niż dla stali E355. W przypadku obciążenia ASN1 wartości naprężenia ekwiwalentnego są istotnie większe niż obserwowane w warunkach obciążenia OP. Stal 1.4301 cechuje zdecydowanie najwyższy poziom dodatkowego umocnienia cyklicznego. Analizując uzyskane wyniki, stwierdzono, że stopień dodatkowego umocnienia nieproporcjonalnego i stopień umocnienia cyklicznego w warunkach rozciągania-ściskania nie są ze sobą powiązane. Obserwując pętle histerezy dla obciążeń asynchronicznych zaobserwować można, że te, które zarejestrowane dla odkształcenia składowego o niższej częstotliwości mają złożony kształt i wiele ekstremów lokalnych. Natomiast pętle histerezy zarejestrowane dla odkształcenia składowego o wyższej częstotliwości charakteryzują się pojedynczymi, lecz zaokrąglonymi wierzchołkami. Wyjątek stanowią pętle histerezy zapisane dla obciążeń, w przypadku których jeden wspólny dla obu składowych odkształceń okres nie jest równy okresowi składowej o niższej częstotliwości. Wartości naprężenia ekwiwalentnego w przypadku stopu aluminium PA38 są dla większości przypadków oraz poziomów obciążenia w przybliżeniu stałe w czasie. Stal E235 dla obciążenia TC, TOR oraz IP w niewielkim stopniu umacniała się w trakcie prób zmęczeniowych. W przypadku obciążeń nieproporcjonalnych stwierdzić można brak jednoznacznego związku przebiegu naprężenia ekwiwalentnego z rodzajem obciążenia lub jego poziomem. Podobne zachowanie zaobserwowano dla stali E355. Wartość naprężenia ekwiwalentnego w przypadku stali 1.4301 wzrastała w trakcie realizacji badania dla wszystkich rodzajów zastosowanych obciążeń, choć tempo przyrostu było zróżnicowane.



Rys. 10. Pętle histerezy odkształcenia normalnego, zarejestrowane dla stali E355, dla obciążenia ASN2b; w legendzie podano poziomy odkształcenia ekwiwalentnego



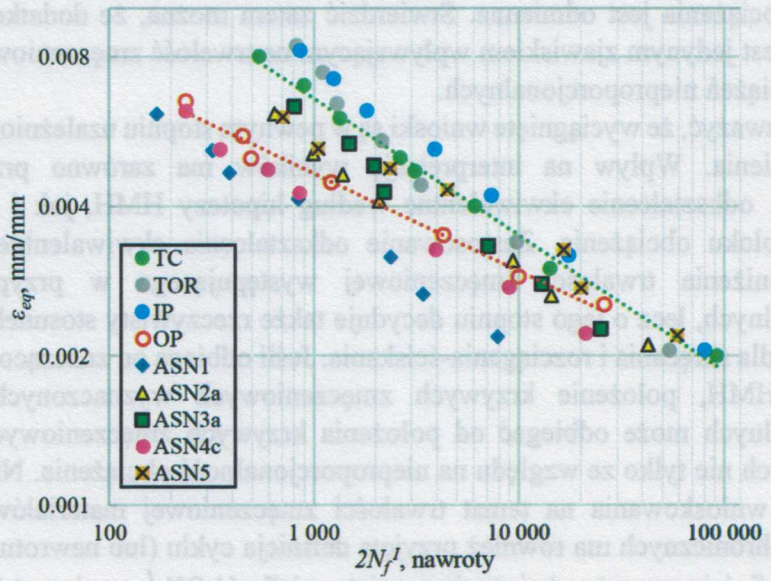
Rys. 11. Porównanie umocnienia cyklicznego stali E355, dla różnych przypadków obciążenia



Rys. 12. Przebiegi naprężenia ekwiwalentnego zarejestrowane dla stali 1.4301, dla obciążenia ASN3a

W celu przeprowadzenia podstawowej analizy trwałości zmęczeniowej sporządzone zostały wykresy w układzie współrzędnych odkształcenie ekwiwalentne wg. hipotezy HMH – liczba nawrotów do zniszczenia (ε_{eq}–$2N_f$). Zastosowano dwa podejścia. W pierwszym, przyjęta liczba nawrotów do zniszczenia odpowiada liczbie nawrotów odkształcenia składowego o niższej częstotliwości, $2N_f{}^I$. W przypadku obciążeń, dla których jeden wspólny dla obu składowych odkształceń okres jest równy okresowi odkształcenia składowego o niższej częstotliwości, liczba nawrotów $2N_f{}^I$ jest dwukrotnością liczby powtórzeń bloku (ścieżki) obciążenia. Podejście to jest równoważne ze spotykanym najczęściej w literaturze. W drugim podejściu za liczbę nawrotów do zniszczenia przyjęto liczbę nawrotów odkształcenia składowego o wyższej częstotliwości, $2N_f{}^{II}$. Wyniki dla wybranych przypadków obciążenia zostały aproksymowane metodą najmniejszych kwadratów przy użyciu krzywej potęgowej.

Dla przykładu, na rys. 13 przedstawiono wykres trwałości zmęczeniowej dla stopu aluminium PA38. Wykresy sporządzone dla pozostałych materiałów i definicji nawrotu oznaczonej jako $2N_f^{II}$ zamieszczone zostały w monografii.



Rys. 13. Trwałość zmęczeniowa stopu aluminium PA38 poddanego wszystkim zastosowanym obciążeniom; trwałość wyrażono w nawrotach odkształcenia składowego o niższej częstotliwości, $2N_f^I$

W zamieszczonym podsumowaniu stwierdzono, że w porównaniu do obciążenia proporcjonalnego (IP), obciążenie OP okazało się być najbardziej niszczące dla stali 1.4301, a najmniej niszczące dla stopu aluminium PA38. Stwierdzić zatem można, że w przypadku zbadanych materiałów, dla tego typu obciążenia istnieje jakościowa korelacja pomiędzy stopniem dodatkowego umocnienia nieproporcjonalnego, a stopniem obniżenia trwałości zmęczeniowej. Dla wszystkich badanych materiałów obciążenie ASN1 było najbardziej niszczące spośród badanych rodzajów obciążeń. Stop aluminium PA38 oraz stal E235 charakteryzowały się większym obniżeniem trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążenia ASN1 niż podczas prób prowadzonych z zastosowaniem obciążenia OP. Natomiast stale E355 i 1.4301 wykazały podobny poziom obniżenia trwałości zmęczeniowej w warunkach obu tych obciążeń. Dla stali E235 i E355 obciążenie ASN1 spowodowało umocnienie nieproporcjonalne znacznie większe niż inne obciążenia nieproporcjonalne. Jednak nie zaobserwowano równie znacznego obniżenia trwałości zmęczeniowej, zwłaszcza w przypadku stali E355. Stopień umocnienia nieproporcjonalnego jakim charakteryzował się stop aluminium PA38 i stal 1.4301 w warunkach obciążeń OP i ASN1 był niemalże identyczny. Materiały te wykazały jednak inny stopień obniżenia trwałości zmęczeniowej. Dla stopu aluminium PA38 trwałości zmęczeniowe w przypadku obciążenia ASN1 są znaczącą niższe niż w przypadku obciążenia OP, natomiast dla stali 1.4301 uzyskano zbliżone obniżenie trwałości dla obu tych rodzajów obciążenia.

Na podstawie analizy trwałości zmęczeniowej wykonanej dla wszystkich zastosowanych przypadków obciążenia stwierdzić można, że dla zbadanych materiałów nie występuje jednoznaczny związek pomiędzy dodatkowym umocnieniem nieproporcjonalnym i obniżeniem trwałości zmęczeniowej w porównaniu do obciążeń proporcjonalnych. Nie zaobserwowano jednoznacznej korelacji pomiędzy stopniem umocnienia nieproporcjonalnego i obniżeniem trwałości zmęczeniowej w ramach zachowania zmęczeniowego poszczególnych materiałów.

Brak także podstaw do stwierdzenia, że dany typ obciążenia nieproporcjonalnego skutkuje podobnym umocnieniem nieproporcjonalnym i obniżeniem trwałości zmęczeniowej dla różnych materiałów, zwłaszcza w relacji do innych przypadków obciążeń nieproporcjonalnych. Również zależność dodatkowego umocnienia cyklicznego i obniżenia trwałości zmęczeniowej od poziomu obciążenia jest odmienna. Stwierdzić zatem można, że dodatkowe umocnienie cykliczne nie jest jedynym zjawiskiem wpływającym na trwałość zmęczeniową materiałów w warunkach obciążeń nieproporcjonalnych.

Należy zauważyć, że wyciągnięte wnioski są w pewnym stopniu uzależnione od przyjętego układu odniesienia. Wpływ na interpretację wyników ma zarówno przyjęty parametr zniszczenia, tj. odkształcenie ekwiwalentne według hipotezy HMH, jak i definicja liczby nawrotów w bloku obciążenia. Zastosowanie odkształcenia ekwiwalentnego pozwala na wykazanie obniżenia trwałości zmęczeniowej występującego w przypadku obciążeń nieproporcjonalnych, lecz o jego stopniu decyduje także rzeczywisty stosunek wytrzymałości zmęczeniowej dla skręcania i rozciągania-ściskania. Jeśli odbiega on znacząco od zakładanego w hipotezie HMH, położenie krzywych zmęczeniowych wyznaczonych dla obciążeń nieproporcjonalnych może odbiegać od położenia krzywych zmęczeniowych dla obciążeń proporcjonalnych nie tylko ze względu na nieproporcjonalność obciążenia. Niezwykle istotne znaczenie dla wnioskowania na temat trwałości zmęczeniowej materiałów w warunkach obciążeń asynchronicznych ma również przyjęta definicja cyklu (lub nawrotu obciążenia). Za podstawową definicję nawrotu obciążenia przyjęto wielkość $2N_f{}^I$, ponieważ jej zastosowanie sugeruje obniżenie trwałości zmęczeniowej dla wszystkich obciążeń asynchronicznych, które są obciążeniami nieproporcjonalnymi. Jest to zgodne z interpretacją prezentowaną w większości źródeł literaturowych. Wykazano jednakże, iż zmiana definicji nawrotu z $2N_f{}^I$ na $2N_f{}^{II}$ powoduje, że ten sam przypadek obciążenia asynchronicznego zinterpretować można jako znacznie obniżający lub zwiększający trwałość zmęczeniową. Dla obu definicji liczby nawrotów w bloku obciążenia asynchronicznego wykazać również można, że istnieje hipotetyczny przypadek obciążenia, w którym różnica w częstotliwości przebiegów odkształceń składowych jest na tyle duża, że dla jednej z nich nie nastąpi zamknięcie cyklu.

Powyższa dyskusja skłania to do refleksji, że dla obciążeń nieproporcjonalnych, a zwłaszcza asynchronicznych niemożliwym jest przyjęcie układu współrzędnych, w którym w sposób jednoznaczny można zaprezentować wyniki badań trwałości zmęczeniowej.

Analizy pęknięć zmęczeniowych na powierzchni próbek dokonano dla stopu aluminium PA38, stali E235 i stali 1.4301. Próbki obserwowano po zakończeniu badań, tj. obserwowano próbki zniszczone. Zdjęcia pęknięć wykonane zostały na optycznym mikroskopie metalograficznym, wyposażonym w kamerę cyfrową. Analiza pęknięć zmęczeniowych jest istotna, ponieważ proces inicjacji i rozwoju krótkich pęknięć stanowi przeważającą część trwałości zmęczeniowej próbek. Z obserwacji dokonanych w trakcie realizacji badań wynika, iż powstanie makropęknięcia odbywa się w zaledwie kilku ostatnich cyklach obciążenia. W literaturze stwierdza się, że na podstawie obserwacji mechanizmu zniszczenia danego materiału należy dokonywać wyboru modelu zmęczeniowego.

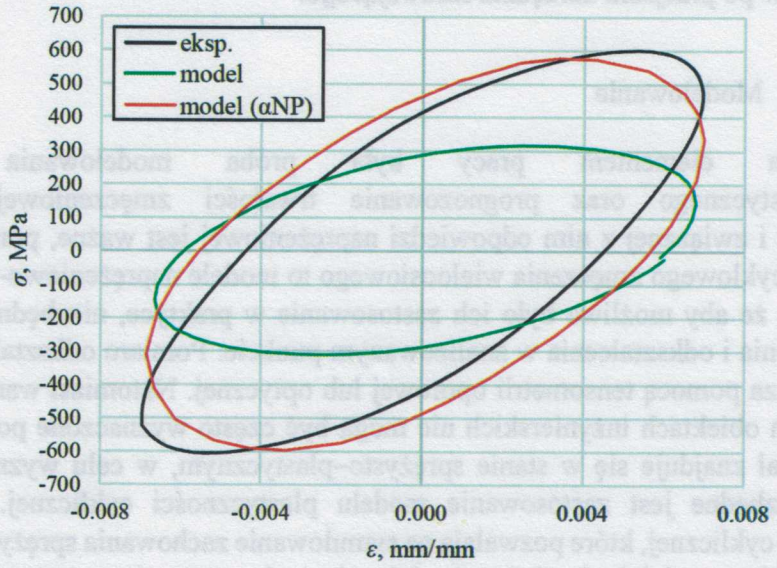
W przypadku stopu aluminium PA38 oraz stali E235 pęknięcia zmęczeniowe inicjują się i propagują na płaszczyznach maksymalnego odkształcenia postaciowego, niezależnie od rodzaju obciążenia. Jeżeli maksymalne wartości odkształcenia postaciowego lub bliskie maksymalnym występują na wielu płaszczyznach, to we wszystkich tych kierunkach zaobserwować można obecność krótkich pęknięć. Jednak bardziej rozwinięte są pęknięcia na płaszczyznach, na których występują także duże dodatnie wartości odkształcenia normalnego,

powodujące otwieranie pęknięcia. Pęknięcia zmęczeniowe obserwowane na powierzchni próbek wykonanych ze stali 1.4301 w dominującym stopniu rozwijają się na płaszczyznach maksymalnego odkształcenia normalnego (płaszczyznach odkształceń głównych). Dla niektórych przypadków i poziomów obciążenia zaobserwować można bardzo krótkie odcinki pęknięć, których kierunek jest zgodny z kierunkiem płaszczyzn maksymalnego odkształcenia postaciowego. Pęknięcia te jednak po osiągnięciu pewnej długości rozgałęziały się w kierunku maksymalnego odkształcenia normalnego. Dla tego materiału istotny wpływ na zachowanie pęknięć miał stan powierzchni wynikający z obróbki skrawaniem. W przypadku obciążeń nieproporcjonalnych, na wysokich poziomach odkształcenia, pęknięcia często rozwijały się wzdłuż śladów po przejściu narzędzia skrawającego.

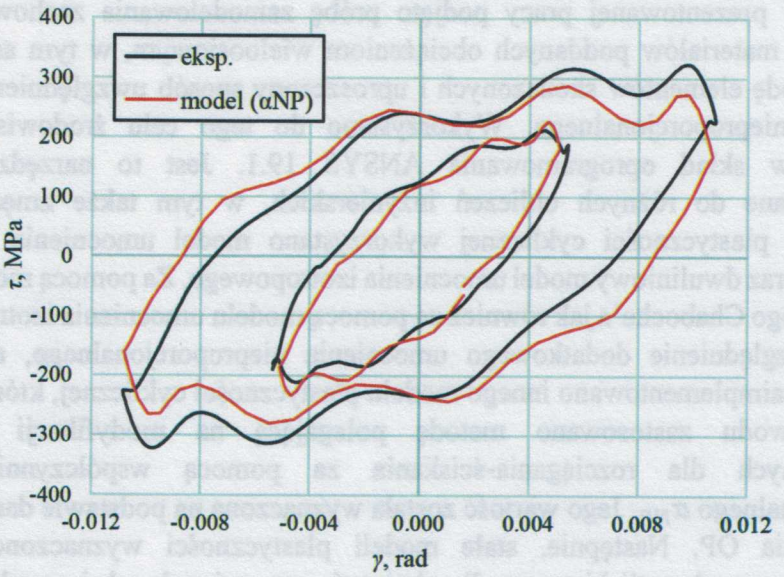
3.2.6. Modelowanie

Kolejnym elementem pracy była próba modelowania odkształcenia sprężysto-plastycznego oraz prognozowanie trwałości zmęczeniowej. Modelowanie odkształcenia i związanej z nim odpowiedzi naprężeniowej jest ważne, ponieważ większość modeli niskocyklowego zmęczenia wieloosiowego to modele naprężeniowo-odkształceniowe. Powoduje to, że aby możliwe było ich zastosowanie w praktyce, niezbędna jest znajomość stanu naprężenia i odkształcenia w analizowanym punkcie. Pomiaru odkształceń dokonuje się powszechnie za pomocą tensometrii oporowej lub optycznej. Natomiast wartości naprężeń w rzeczywistych obiektach inżynierskich nie mogą być często wyznaczone poprzez pomiar sił. Kiedy materiał znajduje się w stanie sprężysto–plastycznym, w celu wyznaczenia wartości naprężeń niezbędne jest zastosowanie modelu plastyczności cyklicznej. Jednak modele plastyczności cyklicznej, które pozwalają na symulowanie zachowania sprężysto–plastycznego materiału poddanego działaniu obciążeń wieloosiowych wymagają wyznaczenia wielu stałych materiałowych, a ich postać matematyczna jest bardzo skomplikowana. Powoduje to, że stosowanie modeli plastyczności cyklicznej w praktyce jest utrudnione. Poszukuje się zatem kompromisu pomiędzy dokładnością modelowania, a złożonością modelu i procedury jego kalibracji. W prezentowanej pracy podjęto próbę zamodelowania zachowania sprężysto–plastycznego materiałów poddanych obciążeniom wieloosiowym, w tym asynchronicznym, stosując metodę elementów skończonych i uproszczony sposób uwzględnienia dodatkowego umocnienia nieproporcjonalnego. Wykorzystano do tego celu środowisko Workbench, wchodzące w skład oprogramowania ANSYS 19.1. Jest to narzędzie powszechnie wykorzystywane do różnych obliczeń inżynierskich, w tym także zmęczeniowych. Do modelowania plastyczności cyklicznej wykorzystano model umocnienia kinematycznego Chaboche'a oraz dwuliniowy model umocnienia izotropowego. Za pomocą modelu umocnienia kinematycznego Chaboche'a jak również za pomocą modelu umocnienia izotropowego nie jest możliwe uwzględnienie dodatkowego umocnienia nieproporcjonalnego, a w środowisku ANSYS nie zaimplementowano innego modelu plastyczności cyklicznej, który na to pozwala. Z tego powodu zastosowano metodę polegającą na modyfikacji pętli histerezy zarejestrowanych dla rozciągania-ściskania za pomocą współczynnika umocnienia nieproporcjonalnego α_{NP}. Jego wartość została wyznaczona na podstawie danych uzyskanych dla obciążenia OP. Następnie, stałe modeli plastyczności wyznaczono na podstawie niezmodyfikowanych pętli histerezy dla obciążeń proporcjonalnych i zmodyfikowanych dla obciążeń nieproporcjonalnych. Główną wadą zaproponowanej metody jest jednoznaczny podział na obciążenia proporcjonalne i nieproporcjonalne. Jednak pozwala ona na stosunkowo

łatwe modelowanie plastyczności cyklicznej materiałów poddanych obciążeniom nieproporcjonalnym. W celu przykładowego zilustrowania uzyskanych wyników, na rys. 14 przedstawiono porównanie pętli histerezy odkształcenia normalnego zamodelowanych bez oraz z zaproponowaną modyfikacją, dla obciążenia OP. Wybrano pętle histerezy wyznaczone dla stali 1.4301, ponieważ materiał ten charakteryzował się najwyższym stopniem umocnienia nieproporcjonalnego. Jako przykład wyników otrzymanych dla obciążeń asynchronicznych, na rys. 15 przedstawiono pętle histerezy odkształcenia postaciowego dla obciążenia ASN3a. Wyniki uzyskane dla pozostałych materiałów i przypadków obciążenia omówiono i zilustrowano w monografii.



Rys. 14. Porównanie pętli histerezy odkształcenia normalnego zamodelowanych bez oraz z zastosowaniem współczynnika dodatkowego umocnienia nieproporcjonalnego, dla obciążenia OP, dla stali 1.4301



Rys. 15. Porównanie wybranych, wyznaczonych eksperymentalnie oraz zamodelowanych pętli histerezy odkształcenia postaciowego dla obciążenia ASN3a, dla stali 1.4301

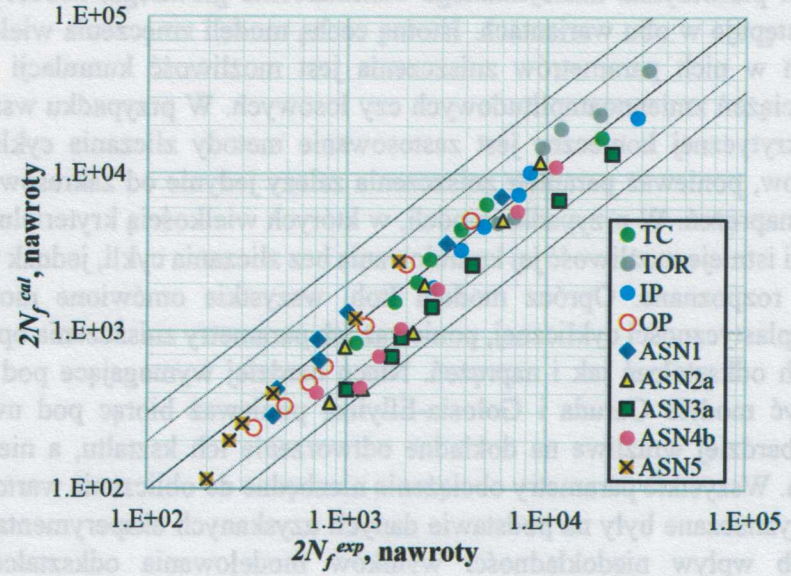
Porównanie wyników obliczeń i eksperymentu dotyczyło pętli histerezy pochodzących ze środka trwałości zmęczeniowej. Dla większości analizowanych rodzajów obciążeń zmęczeniowych, różnice pomiędzy eksperymentalnymi i obliczeniowymi wartościami gęstości energii odkształcenia oraz amplitudami naprężeń nie przekraczały około 30%, w przypadku najwyższych zastosowanych poziomów odkształcenia, dla których różnice te były najwyższe. Dzięki zaproponowanej metodzie wyznaczania stałych materiałowych modelu plastyczności cyklicznej dla obciążeń nieproporcjonalnych uzyskano znaczną poprawę wyników obliczeń. Analizowane rodzaje obciążeń nieproporcjonalnych cechowały się różnymi przebiegami odkształceń składowych oraz stopniem nieproporcjonalności. Wykazywały zatem pewne podobieństwo do obciążeń losowych. Dla wszystkich zastosowanych przypadków obciążenia zaproponowana metoda modelowania zachowania cyklicznego materiału pozwoliła na uzyskanie satysfakcjonujących rezultatów. W ogólnym przypadku stosowanie tej metody powinno zatem prowadzić do poprawy uzyskiwanych wyników w stosunku do podejścia, w którym nie uwzględnia się dodatkowego umocnienia nieproporcjonalnego. Ponadto, wykonanie obliczeń MES w programie ANSYS nie wymagało żadnej zmiany w modelowaniu. Dokonano jedynie modyfikacji danych źródłowych służących do wyznaczenia stałych materiałowych modelu plastyczności.

W celu prognozowania trwałości zmęczeniowej wybrano następujące modele zmęczenia wieloosiowego: Fatemiego-Sociego, Smitha-Watsona-Toppera, Itoh, Garuda, Głosia-Ellyina, Łagody-Machy oraz Glinki. Modele te podzielić można na reprezentujące podejście płaszczyzny krytycznej oraz takie, w których parametr zniszczenia ma postać skalarną i brany jest w nich pod uwagę stan naprężenia i odkształcenia na wszystkich płaszczyznach. W przypadku modeli płaszczyzny krytycznej podziału parametrów zniszczenia można dokonać ze względu na definicję płaszczyzny krytycznej. W modelu Fatemiego-Sociego i Glinki jest nią płaszczyzna maksymalnego odkształcenia postaciowego, a w modelu Smitha-Watsona-Toppera i Itoh płaszczyzna maksymalnego odkształcenia głównego. Model Łagody-Machy natomiast występuje w obu wariantach. Istotną cechą modeli zmęczenia wieloosiowego oraz występujących w nich parametrów zniszczenia jest możliwość kumulacji uszkodzenia w przypadku obciążeń zmiennoamplitudowych czy losowych. W przypadku wszystkich modeli płaszczyzny krytycznej konieczne jest zastosowanie metody zliczania cykli takiej jak np. metoda rainflow, ponieważ parametr zniszczenia zależy jedynie od zakresów lub maksimów odkształceń i naprężeń. W przypadku modeli, w których wielkością kryterialną jest całkowita gęstość energii istnieje możliwość jej kumulowania bez zliczania cykli, jednak to podejście jest bardzo słabo rozpoznane. Oprócz modelu Itoh, wszystkie omówione modele wymagają modelowania plastyczności cyklicznej, ponieważ ich parametry zniszczenia oparte są zarówno na wartościach odkształceń jak i naprężeń. Nieco bardziej wymagające pod tym względem wydają się być modele Garuda i Gołosia-Ellyina, ponieważ biorąc pod uwagę całe pętle histerezy, są bardziej wrażliwe na dokładne odtworzenie ich kształtu, a nie tylko wartości ekstremalnych. Wszystkie parametry obciążenia niezbędne do obliczenia wartości parametrów zniszczenia wyznaczane były na podstawie danych uzyskanych eksperymentalnie. Pominięto w ten sposób wpływ niedokładności wyników modelowania odkształcenia sprężysto-plastycznego na dokładność uzyskanych wyników trwałości zmęczeniowej.

Podstawową formą analizy wyników szacowania trwałości zmęczeniowej, najczęściej spotykaną w literaturze, są wykresy porównania trwałości eksperymentalnych i obliczeniowych. Przykład takiego wykresu przedstawiono na rys. 16. W przypadku obciążenia TC i TOR najwyższą zgodność trwałości eksperymentalnych i obliczeniowych uzyskano stosując modele Fatemiego-Sociego, Garuda, Gołosia-Ellyina, a także Łagody-Machy.

Przyczyną jest uwzględnienie w tych modelach odmiennego udziału składowych normalnych i stycznych naprężeń i odkształceń w zmęczeniowym niszczeniu materiału przez zastosowanie odpowiedniej postaci matematycznej oraz stałych materiałowych. Najdokładniejsze wyniki szacowania trwałości zmęczeniowej w przypadku obciążenia OP uzyskano stosując model Garuda, Gołosia-Ellyina, Łagody-Machy oraz Glinki. Wyniki uzyskane przy użyciu modelu Fatemiego-Sociego oraz Itoh są nieco gorsze, lecz w większości akceptowalne. Świadczy to o tym, że modele reprezentujące podejście energetyczne lepiej opisują zjawisko nieproporcjonalności obciążenia.

Niezależnie od typu obciążenia, w przypadku modeli opartych na założeniu o dominującym udziale stycznych składowych naprężeń i odkształceń w niszczeniu materiału, tj. modelu Fatemiego-Sociego, jednym z wariantów modelu Łagody-Machy czy modelu Glinki, wyniki szacowania trwałości zmęczeniowej uzyskane dla stopu aluminium PA38, stali E235 oraz stali E355 są znacząco dokładniejsze niż dla stali 1.4301. Z kolei stosując modele, w których założono, iż dominujący wpływ na trwałość zmęczeniową mają składowe normalne naprężeń i odkształceń, a mianowicie modele Smitha-Watsona-Toppera, Itoh oraz Łagody-Machy w drugim wariancie, otrzymano wyniki w mniejszym stopniu zgodne z eksperymentalnymi dla stopu aluminium PA38, stali E235 oraz stali E355, a w większym dla stali 1.4301. Powyższe spostrzeżenia są zgodne z wnioskami wynikającymi z obserwacji pęknięć zmęczeniowych. W przypadku stopu aluminium PA38, stali E235 i E355 pęknięcia zmęczeniowe inicjowały się i propagowały w kierunkach maksymalnych odkształceń postaciowych i modele zmęczeniowe oparte na takim mechanizmie zniszczenia dawały lepsze rezultaty szacowania trwałości zmęczeniowej. W przypadku stali 1.4301 pęknięcia zmęczeniowe rozwijały się przede wszystkim w kierunku maksymalnych odkształceń normalnych (odkształceń głównych), a modele zakładające ten mechanizm zniszczenia pozwalały na dokładniejsze prognozowanie trwałości zmęczeniowej.



Rys. 16. Porównanie eksperymentalnej trwałości zmęczeniowej z trwałością obliczoną na podstawie modelu Smitha-Watsona-Toppera, dla stali 1.4301

Zastosowanie w praktyce wszystkich z analizowanych modeli, z wyjątkiem modelu Itoh, wymaga modelowania odkształcenia sprężysto-plastycznego i odpowiedzi naprężeniowej materiału. Dokładność uzyskanych wyników szacowania trwałości zmęczeniowej

bezpośrednio zależy zatem od jakości wyników modelowania plastyczności cyklicznej. Wykorzystanie modelu Itoh wymaga z kolei przeprowadzenia badań zmęczeniowych z zastosowaniem obciążenia OP. Na tle analizowanych modeli zmęczenia niskocyklowego modele Gołosia-Ellyina i Glinki wyróżnia brak jakichkolwiek stałych materiałowych uwzględnionych w parametrze zniszczenia. Ponadto w przypadku analizowanych rodzajów obciążenia i materiałów wyniki szacowania trwałości za pomocą modelu Glinki były zawsze konserwatywne.

3.2.7. Podsumowanie i wnioski

W ramach omówionych badań przeprowadzono niskocyklowe próby zmęczeniowe z zastosowaniem czterech podstawowych przypadków obciążeń synchronicznych oraz dziewięciu przypadków obciążeń asynchronicznych na próbkach wykonanych z czterech materiałów. W literaturze z zakresu zmęczenia materiałów nie były do tej pory publikowane wyniki badań o podobnym zakresie. Uzyskane wyniki wskazują, że różnica częstotliwości odkształceń składowych złożonego stanu odkształcenia ma istotny wpływ na zachowanie zmęczeniowe materiałów. Poniżej zamieszczono wnioski przedstawione w monografii.

Wszystkie z badanych materiałów, poddane obciążeniom asynchronicznym, wykazały wysoki stopień dodatkowego umocnienia nieproporcjonalnego, porównywalny lub w szczególnych przypadkach wyższy niż w warunkach obciążenia z przesunięciem fazowym składowych wynoszącym 90°, które powszechnie uznawane jest w literaturze za najbardziej nieproporcjonalny rodzaj obciążenia zmęczeniowego.

Obciążenia asynchroniczne wpływają także istotnie na trwałość zmęczeniową próbek. W zależności od przyjętej definicji cyklu obciążenia trwałości zmęczeniowe materiałów poddanych obciążeniom asynchronicznym są wyższe lub niższe niż w przypadku obciążeń proporcjonalnych. Jednak najbardziej racjonalnym podejściem wydaje się założenie, że zamkniętej ścieżce odkształcenia odpowiada jeden blok obciążenia asynchronicznego. Interpretacja uzyskanych wyników z zastosowanie takiej definicji prowadzi do konkluzji, że obciążenia asynchroniczne znacząco obniżają trwałość zmęczeniową materiałów. Spostrzeżenie to wydają się potwierdzać także rezultaty analizy wyników szacowania trwałości zmęczeniowej przeprowadzonego z zastosowaniem najpopularniejszych modeli wieloosiowego zmęczenia niskocyklowego. W przypadku obciążeń asynchronicznych prognozowane trwałości zmęczeniowe charakteryzują się podobnym poziomem błędu w porównaniu do trwałości zmęczeniowych wyznaczonych eksperymentalnie, co dla obciążenia z przesunięciem fazowym składowych.

Analiza zdjęć mikroskopowych pęknięć zmęczeniowych widocznych na powierzchni zniszczonych próbek wskazała, że obciążenia asynchroniczne nie wpływają na dominujący mechanizm zniszczenia materiału. Jeżeli w warunkach prostych przypadków obciążenia, jak rozciąganie-ściskanie i skręcanie, dla danego materiału pęknięcia rozwijały się na płaszczyznach maksymalnego odkształcenia postaciowego, taki sam mechanizm obserwowano w przypadku pozostałych obciążeń, w tym asynchronicznych. Analogiczne zachowanie obserwowano w przypadku materiału, dla którego pęknięcia zmęczeniowe rozwijały się na płaszczyznach maksymalnych odkształceń normalnych. Wszystkie analizowane przypadki obciążeń asynchronicznych cechowało występowanie 4 kierunków maksymalnego odkształcenia postaciowego. Na powierzchniach próbek wykonanych z materiałów, dla których

występował tnący mechanizm zniszczenia, obserwowano pęknięcia zmęczeniowe rozwijające się we wszystkich tych kierunkach.

W pracy zaproponowano metodę wyznaczania stałych materiałowych modelu plastyczności cyklicznej Chaboche'a, polegającą na modyfikacji naprężeń pętli histerezy odkształcenia normalnego, wyznaczonych dla rozciągania-ściskania, z wykorzystaniem współczynnika umocnienia nieproporcjonalnego. Wyznaczone w ten sposób stałe materiałowe pozwoliły na modelowanie odpowiedzi naprężeniowej materiału z większą dokładnością niż bez zastosowania wprowadzonej modyfikacji. Szczególnie widoczną poprawę uzyskiwanych wyników zaobserwowano w przypadku badanej stali austenitycznej, która charakteryzowała się bardzo wysokim stopniem dodatkowego umocnienia nieproporcjonalnego. Przedstawiony sposób modelowania odkształcenia sprężysto-plastycznego zaimplementowano w środowisku do obliczeń metodą elementów skończonych ANSYS. Metoda ta wydaje się być stosunkowo nieskomplikowana i możliwa do stosowania w praktyce inżynierskiej, w której powszechnie modeluje się zachowanie materiałów i konstrukcji metodą elementów skończonych.

Wyniki szacowania trwałości zmęczeniowej za pomocą wybranych modeli wskazują, że prognozowanie trwałości zmęczeniowej w warunkach obciążeń asynchronicznych jest zadaniem bardziej wymagającym niż w przypadku obciążeń synchronicznych. Z tego powodu wyniki eksperymentalne uzyskane dla obciążeń asynchronicznych mogą stanowić dane testowe przy wyborze modelu zmęczenia wieloosiowego. W niektórych przypadkach bowiem, dla obciążenia z przesunięciem fazowym odkształceń składowych, otrzymywano zadowalające rezultaty szacowania trwałości, lecz stosując ten sam model w przypadku obciążeń asynchronicznych uzyskane wyniki były mniej dokładne. Fakt ten wydaje się być szczególnie ważny w kontekście ogólnego, losowego przypadku obciążenia wieloosiowego, z którym obciążenia asynchroniczne mają pewne cechy wspólne.

4. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowych

Moje zainteresowania naukowe oraz badawcze związane są z prowadzeniem badań eksperymentalnych i modelowaniem właściwości i zachowania mechanicznego materiałów. Zagadnieniem, którym głównie zajmuję się w pracy naukowej jest zmęczenie wieloosiowe materiałów metalicznych.

Wstęp do zajmowania się tą tematyką stanowiła już praca magisterska, w ramach której stworzony został w środowisku Matlab program służący do wizualizacji złożonego stanu naprężenia i odkształcenia. Następnie, w trakcie studiów doktoranckich i realizacji pracy doktorskiej zająłem się zagadnieniem wysokocyklowego zmęczenia wieloosiowego. Badałem m.in. wpływ stosunku amplitud naprężenia stycznego i normalnego na trwałość zmęczeniową materiałów w warunkach obciążeń z przesunięciem fazowym składowych oraz możliwość modelowania obciążeń nieproporcjonalnych za pomocą wielkości związanych z niezmiennikami stanu naprężenia. Efektem tych prac, oprócz rozprawy doktorskiej, były publikacje w czasopismach naukowych, w tym także z listy JCR.

Po obronie pracy doktorskiej zainteresowałem się tematyką niskocyklowego zmęczenia wieloosiowego. Podjęcie tej tematyki wymagało zdobycia nowej wiedzy teoretycznej oraz praktycznej. W wyniku prowadzonych badań powstały publikacje z listy JCR. Zauważyłem także problem obciążeń asynchronicznych, który podjąłem do realizacji w ramach monografii i projektu badawczego wskazanych w punkcie 3.

Wiedza i doświadczenie zdobyte w wyniku prowadzenia badań naukowych pozwoliły mi na angażowanie się także w prace badawczo-rozwojowe realizowane na potrzeby przemysłu. W pracach tych zajmowałem się opracowaniem rozwiązań konstrukcyjnych, metodyki prowadzenia badań eksperymentalnych oraz analizą wytrzymałościową konstrukcji inżynierskich. W wielu z tych prac stosowałem metody numeryczne, w tym przede wszystkim metodę elementów skończonych.

Za istotny element swojej działalności naukowej uważam także recenzowanie artykułów zgłoszonych do publikacji w czasopismach międzynarodowych oraz projektów badawczych. Do tej pory wykonałem recenzje 21 artykułów dla czasopism z listy JCR oraz 1 projektu zgłoszonego do realizacji w ramach konkursu OPUS, organizowanego przez Narodowe Centrum Nauki.