

Badania i obliczenia trwałości zmęczeniowej złożonych struktur spawanych

(autoreferat rozprawy doktorskiej)

mgr inż. Michał Piotrowski

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im Jana i Jędrzeja
Śniadeckich w Bydgoszczy
Wydział Inżynierii Mechanicznej

Promotor rozprawy

Prof. dr hab. inż. Stanisław Mroziński

Publiczna obrona rozprawy doktorskiej

Bydgoszcz, 13.07.2021

1. Wprowadzenie

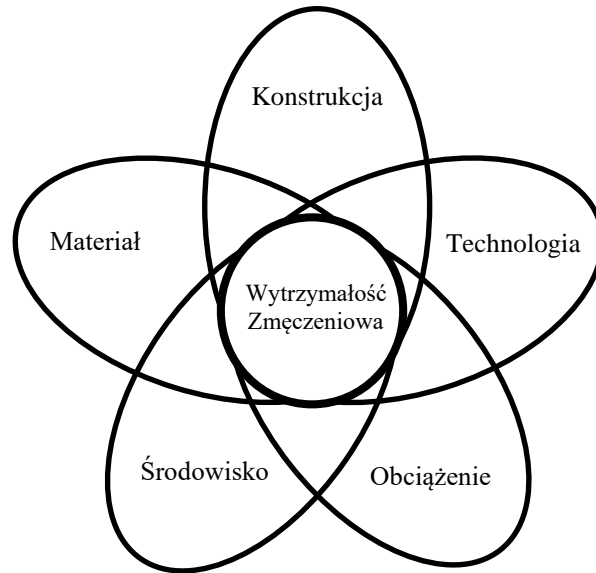
Konstrukcje współczesnych pojazdów szynowych, statków morskich czy samolotów stanowią efekt wielu lat ich ewolucji, rozwoju nauki oraz doskonalenia metod obliczeniowych. Podczas projektowania pierwszych obiektów z tej grupy dominowały przede wszystkim względy bezpieczeństwa. Małą skuteczność metod obliczeniowych rekompensowano najczęściej dużymi współczynnikami bezpieczeństwa. Powodowało to, że produkowane konstrukcje były ciężkie, zawodne i mało efektywne, zarówno w budowie, jak i w eksploatacji (Rys. 1).

Wzrost wymagań użytkowników np. co do umieszczania na pokładzie pojazdów szynowych dodatkowych urządzeń takich jak układy klimatyzacji, wentylacji oraz tendencje do zwiększania liczby przewożonych pasażerów czy ładunków na jednostkę powierzchni spowodowały, że wzrosła masa całkowita pojazdu przy jednoczesnym niekorzystnym wzroście nacisku pojazdu szynowego na tor. Spowodowało to konieczność optymalizacji istniejących rozwiązań konstrukcyjnych na podstawie zadanych kryteriów – np. redukcji ich masy, zwiększenia wytrzymałości, poprawy właściwości fizycznych i mechanicznych, jak również termicznych. Pomaga temu rozwój narzędzi obliczeniowych, w tym metod numerycznych, które w stosunku do klasycznych metod analitycznych pozwalają na istotne przyspieszenie obliczeń coraz bardziej złożonych konstrukcji.



Rys. 1. Gotowe produkty firmy PESA

Na podstawie doniesień literaturowych można stwierdzić, że większość pojawiających się złożonych obiektach technicznych (pojazdy szynowe, statki, samoloty) pęknięć oraz uszkodzeń ma najczęściej charakter zmęczeniowy. Przyjmuje się, że trwałość zmęczeniowa tego typu obiektów jest wypadkową pięciu podstawowych grup czynników (Rys. 2). Należą do nich: cechy geometryczne oraz materiałowe, zastosowana technologia wykonania, przebieg i warunki obciążenia. Bardzo złożony i interdyscyplinarny charakter wymienionych czynników oraz nieustalone relacje między nimi nie pozwalają obecnie na opracowanie jednolitej metodyki analizy zmęczeniowej tych obiektów, która by uwzględniała całą specyfikę procesu pęknięcia zmęczeniowego.



Rys. 2. Czynniki wpływające na trwałość zmęczeniową

Pojęcie elementu konstrukcyjnego jest nierozdzielnie związane z karbem powstałym ze względów konstrukcyjnych, funkcjonalnych czy technologicznych (Rys. 3) Takim karbem są również występujące spoiny wraz ze strefami przyległymi (SWC) Obecnie trudno sobie wyobrazić współczesne budownictwo okrętowe czy kolejowe bez łączenia materiałów metodą spawania.



Rys. 3. Przykład połączenia spawanego

Ta metoda łączenia, oprócz bardzo wielu zalet, generuje szereg nowych zagadnień, które wymagają uwzględnienia w procesie projektowania. Do najważniejszych można zaliczyć powstanie karbu geometrycznego, karbu strukturalnego oraz powstanie w obszarze spoiny

bardzo niekorzystnych naprężeń spawalniczych co istotnie skomplikowało metody obliczeń spawanych elementów konstrukcyjnych poddanych obciążeniom zmiennym.

Obecnie ostateczna weryfikacja poprawności dobranych cech konstrukcyjnych projektowanego obiektu technicznego ma najczęściej miejsce na zakończenie procesu projektowo-konstrukcyjnego. Odbywa się to poprzez odpowiednio zaplanowane prace badawcze mające na celu sprawdzenie wytrzymałości doraźnej lub zmęczeniowej. W przypadku negatywnego wyniku testów wprowadza się zmiany i powtarza w sposób iteracyjny kolejne etapy aż do uzyskania pozytywnego wyniku badania. Dla wielkogabarytowych obiektów technicznych, które to zawsze są bardzo drogie, nie jest możliwe ze względów ekonomicznych prowadzenie końcowych badań na dużej populacji obiektów, tak jak się to odbywa w przypadku obiektów prostych i w miarę tanich. W tym przypadku traci sens pojęcie prototypu. Każdy wyprodukowany obiekt techniczny jest swego rodzaju prototypem poddanym eksploatacji. W przypadku obiektów drogiej producent na takie działania nie może sobie pozwolić. Ciągła rywalizacja pomiędzy firmami, konkurencja i wyścig technologiczny powodują, że końcowy sukces jest determinowany między innymi czasem opracowania projektu i jego wdrożenia, jak również kosztami tych działań. Producenci, którzy są w stanie zaprojektować i wyprodukować wyrób o wyższej jakości, lżejszy, tańszy, bardziej bezpieczny i niezawodny uzyskują z tego tytułu dodatkowe korzyści ekonomiczne w stosunku do producentów i użytkowników wyrobu o przeciętnej jakości, a tym bardziej niskiej. Przewaga ta powstaje już w pierwszych etapach procesu projektowo-konstrukcyjnego wyrobu i dotyczy wszystkich aspektów jego istnienia: materiałowego, energetycznego, wydajnościowego, ekologicznego itp.

W przypadku elementów transportu szynowego trwałość zmęczeniowa należy do podstawowych cech określających jakość. Aby poziom ten spełniał wszystkie zadane kryteria trwałość zmęczeniowa powinna być rozpatrywana na wszystkich etapach procesu projektowo-konstrukcyjnego. W przeciwnym przypadku uzyskiwana trwałość gotowego obiektu będzie przypadkowa, a nie na wymaganym i oczekiwanym poziomie.

Teza pracy

Stosowane obecnie procedury projektowania złożonych i odpowiedzialnych struktur spawanych charakteryzują się dużą kosztochłonnością i zawodnością. Istnieje możliwość ograniczenia liczby kosztownych badań pełnowymiarowych obiektów technicznych poprzez ich częściowe zastąpienie badaniami elementarnych węzłów spawanych bez obniżania ich projektowanej trwałości.

Cel pracy

Celem podstawowym pracy jest opracowanie oraz doświadczalna weryfikacja metody projektowania spawanego obiektu technicznego, w której ograniczona zostanie liczba kosztownych badań eksperymentalnych całych obiektów. Weryfikacja metody zostanie przeprowadzona na przykładzie ramy wózka pojazdu szynowego.

Cele dodatkowe to:

- poprawa bezpieczeństwa i niezawodności złożonych, odpowiedzialnych struktur spawanych,
- analiza możliwości uwzględniania w procesie projektowo-konstrukcyjnym złożonych struktur spawanych nowoczesnych metod numerycznych i badań doświadczalnych.

Zakres pracy

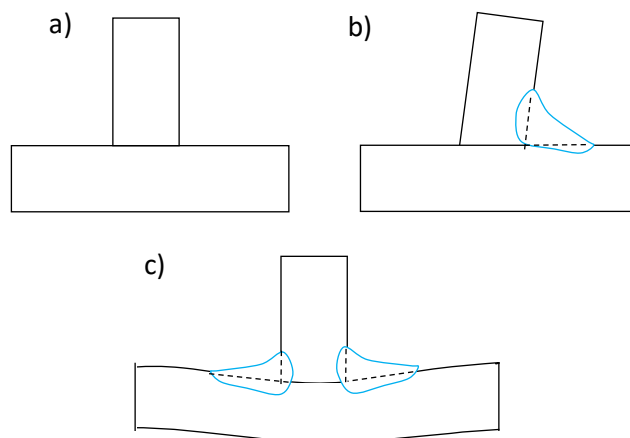
Zakres pracy doktorskiej wymagał przeprowadzenia szeregu badań i analiz, z których najważniejsze to:

- przegląd aktualnej wiedzy dotyczącej projektowania złożonych konstrukcji spawanych,
- wybór złożonej struktury spawanej i identyfikacja jej obciążeń,
- analiza numeryczna obiektu i dekompozycja na węzły,
- identyfikacja materiałów stosowanych w konstrukcji,
- badania elementarnych węzłów i zespołów,
- badania końcowe złożonej struktury.

3. Analiza stanu wiedzy w zakresie tematu rozprawy

Oprócz bardzo wielu zalet połączeń spawanych ich podstawową wadą są bardzo duże naprężenia spawalnicze. Poziom naprężeń zależy od bardzo wielu czynników związanych min z technologią spawania, konstrukcją połączenia, przygotowaniem elementów, rodzaju spawania. Ich występowanie wpływa negatywnie na stabilność wymiarową konstrukcji, powodując w długim czasie jej odkształcenia, a także zwiększając podatność na pękanie zmęczeniowe. Dotyczy to przede wszystkim obszarów koncentracji naprężeń, którymi mogą być różnego rodzaju karby (spoiny, zgrzeiny, itp).

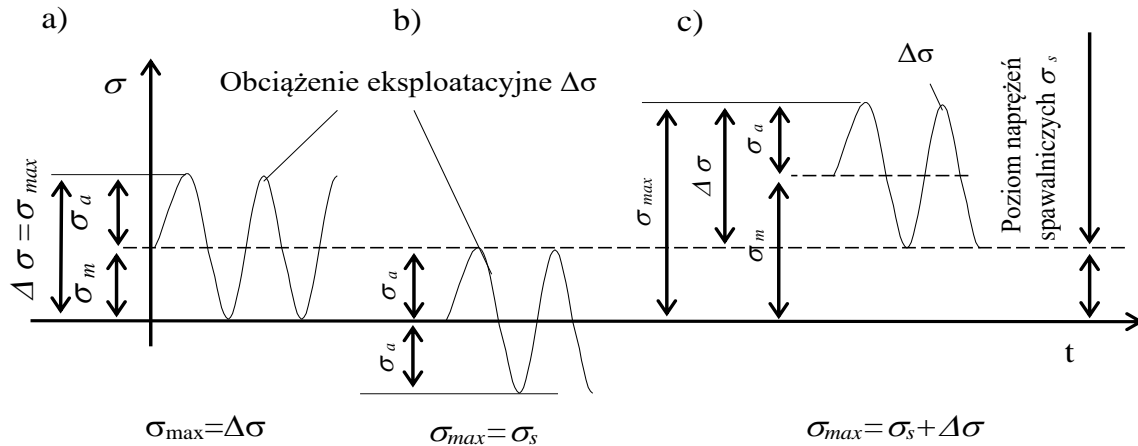
Naprężenia spawalnicze σ_s mogą osiągać w złączu spawanym wartości zbliżone do granicy plastyczności materiału elementów łączonych. Skutkiem tych naprężeń w wyniku spajania elementów dochodzi często do deformacji spawalniczych. Na rysunku 3 pokazano możliwe przykłady połączeń teowych przed i po procesie spawania.



Rys. 4. Przykłady deformacji połączeń spawanych: a) przed spawaniem, b, c) po spawaniu

Poza zmianami cech geometrycznych skutki spawania przedstawione nie stanowią problemu, gdy łączone elementy nie są utwierdzone i mają możliwość swobodnego przemieszczania po spawaniu (Rys. 4b i 4c). W przypadku złożonych konstrukcji spawanych możliwość przemieszczania łączonych elementów jest najczęściej ograniczona innymi węzłami konstrukcyjnymi, co powoduje powstanie w obszarze spoiny naprężeń spawalniczych.

Ze względu na przedstawione skutki spawania określanie naprężeń spawalniczych należy do bardzo ważnego zadania w procesie projektowo-konstrukcyjnym, zwłaszcza w przypadku obiektów wielkogabarytowych. Jest to spowodowane faktem, że naprężenia spawalnicze σ_s , pomimo, że mają stałą wartość, to sumują się ze zmiennymi naprężeniami eksploatacyjnymi $\Delta\sigma$. Na rysunku 5 pokazano w sposób schematyczny przykłady możliwego położenia zmian naprężenia eksploatacyjnego i spawalniczego σ_s . Występujące sumowanie naprężeń powoduje zmianę naprężeń średnich σ_m maksymalnych σ_{max} , a w konsekwencji poziomu współczynnika asymetrii cyklu obciążenia R i zakresu zmian współczynnika intensywności naprężeń ΔK .



Rys. 5. Położenie naprężeń eksploatacyjnych $\Delta\sigma$ w stosunku do naprężeń spawalniczych σ_s

Najbardziej niekorzystnym wariantem spośród przedstawionych na rysunku 5 jest przypadek pokazany na 5c. W wariantcie tym naprężenia σ_{max} w obszarze spoiny będą sumą naprężeń spawalniczych σ_s i naprężeń eksploatacyjnych σ_a . Maksymalne naprężenia σ_{max} występują najczęściej w obszarach występowania spoin. Z tego powodu obszary występowania spoin stały się naturalnym miejscem inicjacji pęknięć zmęczeniowych, które rozwijając się mogą doprowadzić do poważnych awarii czy katastrof.

3.1. Wpływ naprężeń spawalniczych na pękanie zmęczeniowe

W analizach zmęczeniowych konstrukcji spawanych wykorzystuje się najczęściej wyniki badań próbek materiałowych w postaci wykresów w układzie współrzędnych σ - N . Należy jednak zdawać sobie sprawę, że w próbkach materiałowych ma miejsce prosty rozkład naprężeń spawalniczych. Wyniki badań na próbkach nie uwzględniają złożonego charakteru naprężeń spawalniczych występujących w połączeniach spawanych złożonych obiektów podczas eksploatacji. Jak wynika z przeprowadzonych analiz wielkość i rozkład naprężeń spawalniczych zmienia się w zależności od kolejności spawania. Zatem w projektowaniu złożonych konstrukcji spawanych nie zawsze istnieje możliwość adaptacji prostych wykresów zmęczeniowych uzyskanych z wykorzystaniem prostych próbek materiałowych. Dzieje się tak głównie dlatego, że interakcje między różnymi naprężeniami spawalniczymi a przyłożonymi obciążeniami mogą skutkować różnymi reakcjami na odkształcenia i trwałość zmęczeniową w porównaniu z badaniami próbek realizowanymi dla opracowania wykresu zmęczeniowego. Ponadto zwykle

przyjmuje się, że naprężenia ściskające mają korzystny wpływ na rozwój uszkodzenia zmęczeniowego.

3.2. Metody poprawy trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych

Jednym z podstawowych działań zmierzających do poprawy trwałości zmęczeniowej jest obniżanie naprężeń spawalniczych. W celu ich zmniejszenia już na etapie projektowania ustala się odpowiednią technologię spawania z podaniem kolejności wykonywania poszczególnych spoin i kolejność ściągów w spoinie. Obecnie znanych i stosowanych jest wiele metod obniżania naprężeń spawalniczych. Można je podzielić na trzy podstawowe grupy:

a) pierwsza grupa przewiduje obniżenie ogólnego poziomu naprężeń spawalniczych przez różne rodzaje obróbki cieplnej (wyżarzanie odprężające, wyżarzanie normalizujące, odpuszczanie), a także technologie otrzymywania półfabrykatów z regulacją prędkości chłodzenia.

Mimo pozytywnych efektów wyżarzania odprężającego metoda posiada jednak wiele wad, które powodują jej ograniczony zakres zastosowania do odprężania konstrukcji spawanych. Należą do nich:

- możliwe odkształcenia konstrukcji podczas wyżarzania np. pod własnym ciężarem,
- naprężenia po prostowaniu powstałe w przypadku, gdy występujące po wyżarzaniu odkształcenie likwidowane jest przez prostowanie na zimno,
- naprężenia od nierównomiernego nagrzewania/stygnięcia,
- utlenianie powierzchni, jej odwęglanie, powstawanie zgorzliny w przypadku, gdy nie wyżarza się w atmosferze ochronnej lub w próżni i związana z tym konieczność dodatkowej obróbki polegającej na usuwaniu zgorzliny,
- odpuszczenie stali ulepszanych z niską temperaturą odpuszczania,
- kruchość stali i pękanie stali wraz ze zmianą własności mechanicznych, które powodują powstawanie braków w wyniku pęknięcia konstrukcji.

b) druga grupa przewiduje stabilizację stanu naprężeń i wymiarów przy nieznacznym obniżeniu poziomu naprężeń (starzenie naturalne, starzenie termouderzeniami, odkształcenia plastyczne, odprężanie wibracyjne i inne). Zastosowanie tych metod pozwala na zmniejszenie wielkości deformacji półfabrykatów w czasie następnej obróbki.

c) do trzeciej grupy można zaliczyć metody pozwalające na drodze technologicznej zmniejszyć momenty nie zrównoważonych sił wewnętrznych, powstających np. w czasie obróbki ubytkowej i odpowiednio zmniejszyć deformacje elementów.

Poprawa trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych obejmuje najczęściej wiele działań. Należą do nich zarówno zbiegi obniżające poziom naprężeń spawalniczych opisane w poprzednim punkcie, jak również dodatkowe zabiegi technologiczne wykonywane specjalnie w obszarach spoin już po zabiegach obniżających naprężenia spawalnicze. Dużym krokiem w kierunku praktycznych zastosowań wyników badań naukowych w projektowaniu maszyn i elementów konstrukcyjnych są procedury FITNET.

Tab. 1. Podział metod poprawy właściwości zmęczeniowych obiektów spawanych

Modyfikacje naprężeń pospawalniczych	Metody mechaniczne	Śrutowanie	Młoteczkowanie
			Igłowanie
			Kulowanie
			Kulowanie ultradźwiękowe
		Metody przeciążeniowe	Wstępne przeciążenie
	Miejscowe ściskanie		
	Metody termiczne	Wyżarzanie odprężające	
		Grzanie punktowe	
		Metoda Gunnerta	
		Elektrody niskotemperaturowej transformacji	
Elektrody niklowe			
Modyfikacje karbu u podstawy spoiny	Metody mechaniczne	Szlifowanie bruzd	
		Żłobienie strumieniem wody	
		Szlifowanie ręcznymi szlifierkami	
	Metody przetopu powtórnego	Przetapianie metodą TIG	
		Przetapianie strumieniem plazmy	
		Przetapianie strumieniem lasera	
	Specjalne techniki spawania	Kontrolowanie kształtu lica spoiny	
		Specjalizowane elektrody	

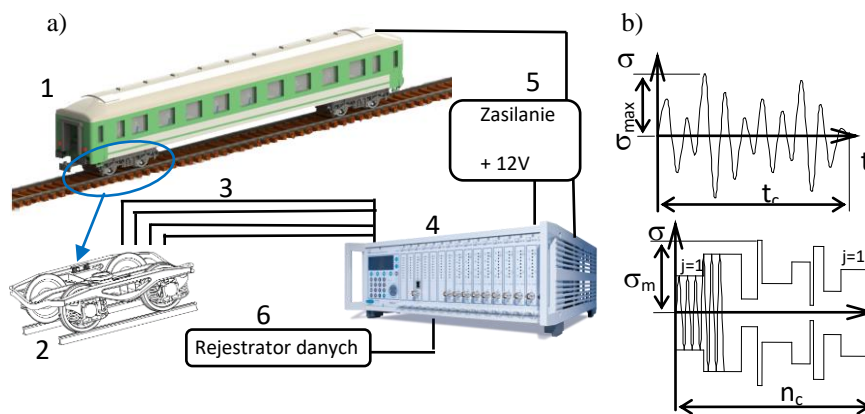
Na rysunku 6 pokazano przykład odprężania wibracyjnego spawanej czołownicy pojazdu szynowego. Na uwagę zasługuje porównanie gabarytów samego wibratora w stosunku do wymiarów odprężanej konstrukcji. Metoda wibracyjna ma wiele zalet w porównaniu z wyżarzaniem odprężającym.



Rys. 6. Stanowisko do odprężania czołownicy pojazdu szynowego

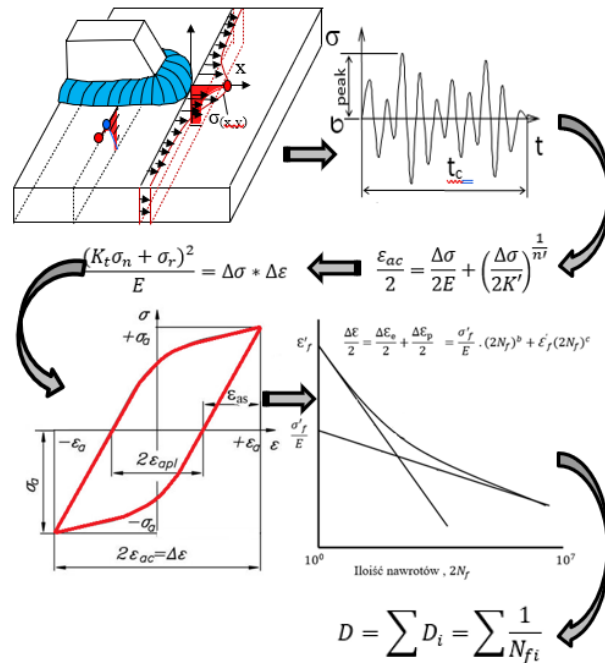
3.3. Metody analizy trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych

Podstawą analizy trwałości zmęczeniowej jest znajomość historii obciążenia, wykresu zmęczeniowego oraz przyjęcie odpowiedniej hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych. Przebieg obciążenia jest najczęściej pozyskiwany w warunkach eksploatacji projektowanych obiektów. W przypadku pojazdów szynowych odbywa się to najczęściej podczas jazdy w charakterystycznych warunkach definiowanych stanem toru, liczbą przewożonego ładunku (pasażerów), prędkością pojazdu, jazdą po łukach rozjazdach itp. Zarejestrowane przebiegi obciążenia w krytycznych punktach obiektu poddawane są opracowaniu (schematyzacji). Efektem schematyzacji jest widmo obciążenia. Uproszczony schemat tego etapu opracowania wyników pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Pomiar obciążeń eksploatacyjnych: a) 1- analizowana struktura, 2- badany agregat, 3- czujniki pomiarowe, 4- wzmacniacz pomiarowy, 5- zasilanie, 6- rejestrator danych, b) rejestrowane przebiegi eksploatacyjne i opracowane programy obciążeniowe

Uzyskane podczas opracowania wyników pomiarów obciążeń eksploatacyjnych są wykorzystywane zarówno podczas obliczeń analitycznych jak również analiz numerycznych. Na rysunku 8. pokazano dalsze etapy postępowania podczas analizy trwałości zmęczeniowej w której wykorzystywane są dane materiałowe w ujęciu odkształceniowym.



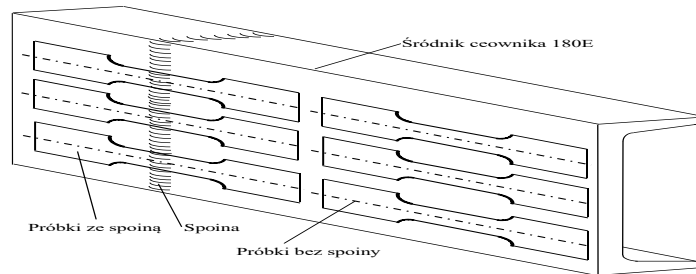
Rys. 8. Analiza trwałości zmęczeniowej w ujęciu odkształceniowym

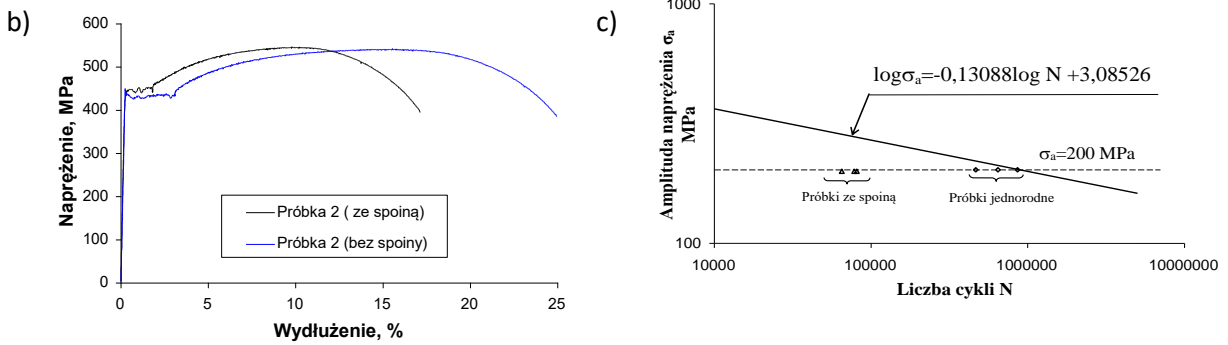
3.4. Wpływ spawania na właściwości zmęczeniowe połączeń spawanych

a) proste próbki materiałowe

Na podstawie dostępnej wiedzy można stwierdzić, że prawidłowo wykonane spoiny nie powodują obniżenia podstawowych parametrów wytrzymałościowych określanych w próbie statycznego rozciągania. Fakt ten zilustrowano na rysunku 9a gdzie pokazano wyniki porównawcze rozciągania badań próbek jednorodnych i spawanych. Próbki jednorodne (bez spoin) oraz próbki zawierające spoiny wycięto z ceownika 180E. W celu uniknięcia występowania karbu geometrycznego przed wycięciem próbek z ceownika poddano dodatkowo obróbce mechanicznej mającej na celu usunięcie lica spoiny oraz grani.

a)



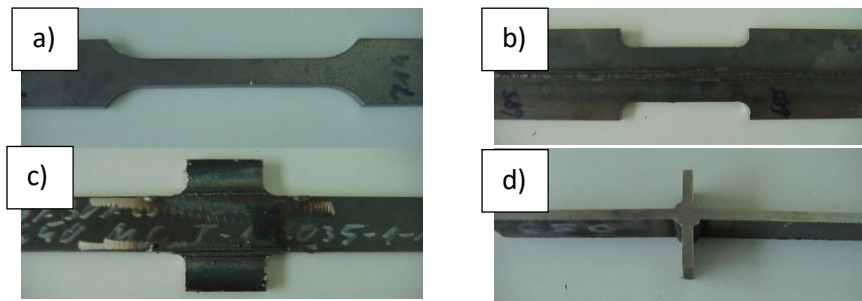


Rys. 9. Wyniki badań próbek (18G2A) bez spoiny oraz ze spoiną: a) obiekt badawczy, b) wytrzymałość, c) trwałość

Sytuacja jest zdecydowanie inna w przypadku obciążeń zmiennych. Trwałość zmęczeniowa próbek spawanych jest zdecydowanie niejsza od trwałości próbek jednorodnych (Rys. 9b).

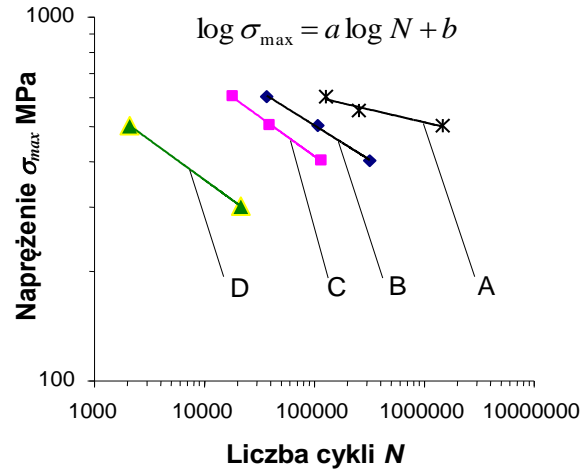
b) różne postacie połączeń

W złożonych obiektach stosuje się różne rodzaje spoin. Dla projektanta ważna jest informacja na temat wpływu określonej postaci spoiny na stan naprężeń, jak również na trwałość zmęczeniową. Biura projektowe w celu poszerzenia wiedzy i wzbogacenia bazy danych prowadzą własne badania dotyczące określania trwałości charakterystycznych połączeń spawanych występujących w konstrukcjach. Podczas badań wykorzystywane były różne postacie próbek wykonanych ze stali 650. Kształt próbek pokazano na rysunku 10.



Rys. 10. Obiekty badań: a) próbka gładka (typ A), b) ze spoiną wzdłużną (typ B), c) ze spoinami wzdłużnymi (typ C), d) połączenie krzyżowe (typ D)

Uzyskane podczas badań zmęczeniowych trwałości zestawiono na rysunku 11 w postaci wykresów zmęczeniowych w układzie liczba cykli do pęknięcia N – napężenie σ_{max} . Wykresy zmęczeniowe w układzie bilogarytmicznym aproksymowano równaniem o postaci opisanej na rysunku 11.

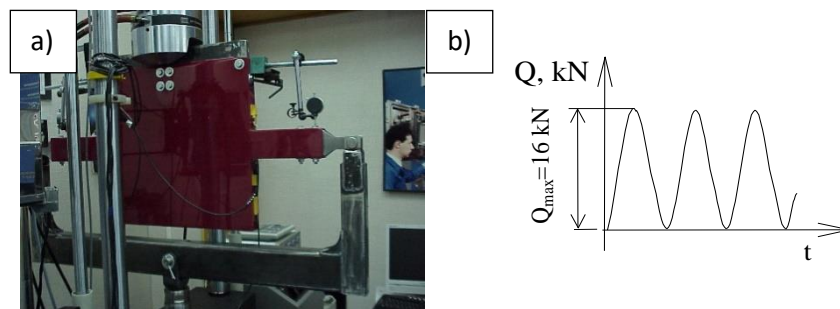


Rys. 11. Wykresy zmęczeniowe dla różnych węzłów (stal 650)

Uzyskane wyniki potwierdzają wpływ postaci spoiny na trwałość. Potwierdzają konieczność systemowego powiązania właściwości zmęczeniowych połączeń spawanych z trwałością kompletnego obiektu spawanego.

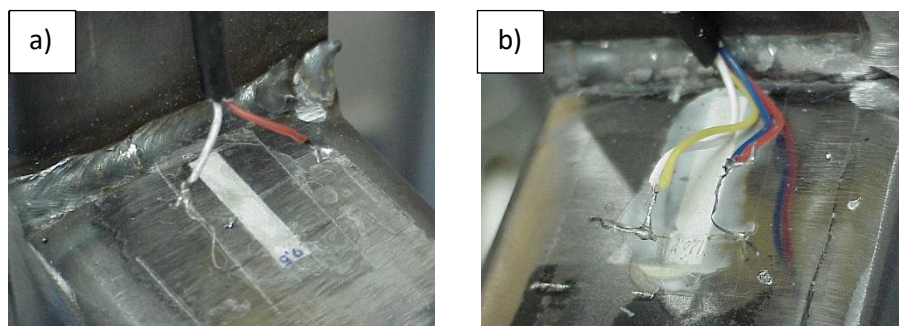
c) Węzły spawane

Właściwości zmęczeniowe normatywnych połączeń spajanych nie pozwalają na pełną ocenę połączeń spawanych i optymalizację konstrukcyjną gotowego obiektu. Do właściwości zmęczeniowych obiektu rzeczywistego zbliżają konstruktora wyniki badań prowadzonych na specjalnie spreparowanych węzłach spawanych. Na rysunku 12 pokazano przykład badań węzła spawanego. Wyniki takich badań pozwalają określić trwałość jak również poziom naprężeń spawalniczych oraz ich redystrybucję podczas obciążenia zmiennego.



Rys. 12. Stanowisko do badań: a) widok, b) stosowany program obciążenia

Wyniki takich badań pozwalają na wstępną weryfikację wyników obliczeń analitycznych. W wyniku badań węzłów konstruktorzy uzyskują informacje dotyczące lokalizacji miejsc spiętrzenia naprężeń i występowania pęknięć zmęczeniowych i ewentualnej konieczności przeprowadzenia niezbędnych modyfikacji konstrukcyjnych (Rys. 13).

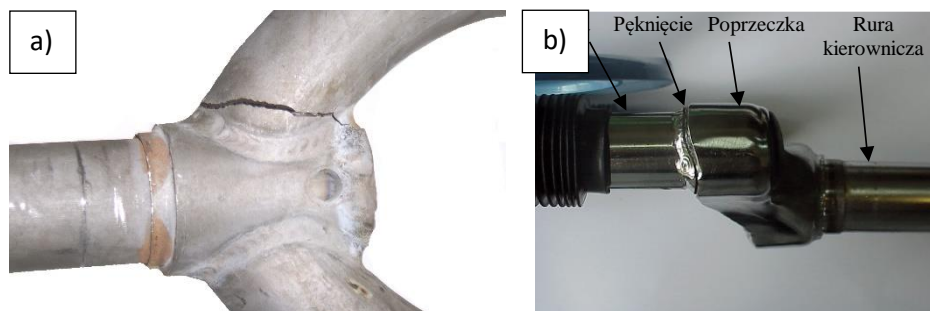


Rys. 13. Pomiar odkształceń w miejscach spiętrzenia naprężeń

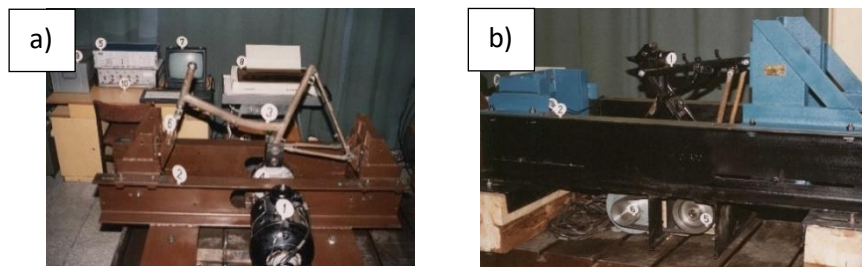
Na podstawie przeprowadzonych analizy uszkodzeń badanych węzłów oraz miejsc inicjacji pęknięć stwierdzono, że sprzyjały im lokalne wady samej spoiny pachwinowej oraz uszkodzenia powstałe podczas obróbki mechanicznej spoin. Inicjacji pęknięcia sprzyjał np. brak przetopu materiału w obszarze występowania maksymalnych naprężeń gnących. Innym przykładem wad zaobserwowanych na badanych obiektach było rozpoczynanie i kończenie spoiny pachwinowej na krawędzi profilu w obszarze występowania maksymalnych naprężeń gnących.

d) Gotowe obiekty techniczne

Na koniec trochę autoreklamy własnego ośrodka, który w tym obszarze posiada sporo doświadczeń. W latach 80 i 90 tych poprzedniego wieku zespół Pana Profesora J. Szali realizował szerokie badania zmęczeniowe elementów pojazdów jednośladowych. Badaniom poddawano widelce rowerowe (Rys. 14) oraz ramy (Rys. 15). Badania zmęczeniowe tych obiektów prowadzono na specjalnych stanowiskach badawczych. Do realizacji obciążeń zmiennych oprócz wibratorów bezwładnościowych zastosowano wibratory kinematyczne. Biorąc pod uwagę koszty eksploatacji ówczesnych stanowisk i obecnych stanowisk to można powiedzieć, że charakteryzowała je prostota i niskie koszty eksploatacji.



Rys. 14. Pęknięcia zmęczeniowe widelca: a) położenie pęknięcia, b) postać



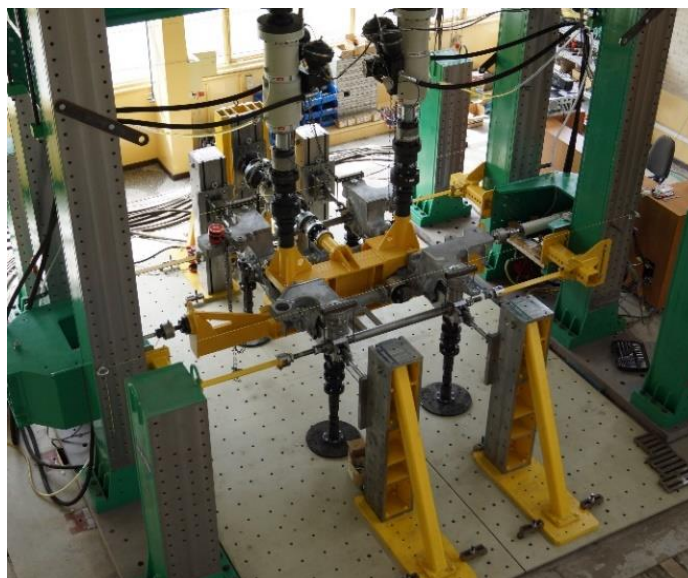
Rys. 15. Badania gotowych obiektów: a) ram rowerowych, b) ram motorowerowych

Badania te pozwalały w dużym zakresie doskonalić technologię i poprawiać trwałość zmęczeniową tych obiektów. Zdobyte wówczas doświadczenia stały się podstawą rozwoju naukowego wielu obecnych pracowników Wydziału.

Trudno jednak widelec rowerowy czy ramę rowerową porównywać z pociągiem statkiem czy strukturą maszyny roboczej. Badania zmęczeniowe wielkogabarytowych konstrukcji kolejowych, maszyn roboczych, obiektów okrętowych stanowią specyficzną grupę badań. Ze względu na gabaryty badania takie prowadzi się albo na modelach wykonywanych w odpowiedniej skali lub, jeśli to możliwe, na rzeczywistych obiektach. Pomimo zmniejszenia, jak również ze względu na złożoność rozwiązań konstrukcyjnych, specyfikę obciążeń oraz przeznaczenie istnieją w tym przypadku trudności w zakresie badań gotowych obiektów na uniwersalnych maszynach wytrzymałościowych.

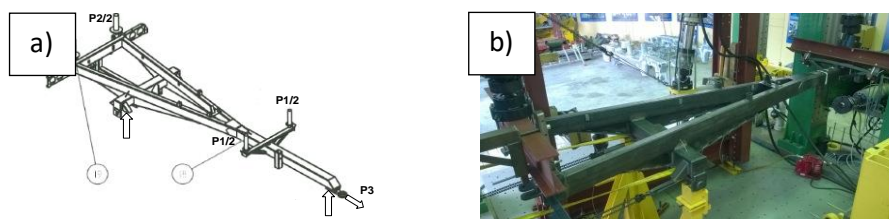
Do badań takich obiektów niezbędne są specjalistyczne stanowiska, złożone układy obciążenia oraz sterowania. Stanowiska te najczęściej dedykowane są określonemu typowi obiektów np. samolotom (Instytut Lotnictwa w Warszawie), pojazdom szynowym (Instytut Kolejnictwa w Warszawie, Instytut Pojazdów Szynowych TABOR w Poznaniu oraz Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy), węzłom spawanym statków morskich (Laboratorium Konstrukcji Oceanotechnicznych na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa). Jednostki te specjalizują się w badaniach tej klasy obiektów i posiadają do ich realizacji odpowiednie wyposażenie. Warunki badań tych obiektów narzucają wysokie wymagania zarówno co do infrastruktury badawczej, jak również systemu zadawania obciążeń.

W ramach projektu INNOTECH realizowanego w konsorcjum z firmą PESA S.A. na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy zaprojektowane zostało i wykonane stanowisko badawcze dedykowane badaniom ram wózków pojazdów szynowych (Rys. 16). Obecnie na stanowisku można realizować badania dla ośmiu kierunków obciążenia. Ze względu na fakt wykorzystywania stanowiska podczas badań własnych na rysunku pokazano widok tego stanowiska.



Rys. 16. stanowisko badawcze do badań ram wózków pojazdów szynowych

Na stanowisku istnieje możliwość badań innych niż kolejowe struktur spawanych. Na rysunku 17 pokazano przykład badań ramy spawanej wozu paszowego.



Rys. 17. Rama przyczepy rolniczej: a) schemat obciążenia, b) widok stanowiska

4. Podsumowanie i krytyczna ocena stanu wiedzy

- a) Ze względu na naprężenia spawalnicze powstające w krytycznych obszarach węzłów spawanych złożonej struktury obiektu na etapie projektowania nie zawsze zostają odwzorowane rzeczywiste naprężenia występujące w warunkach eksploatacji obiektu. Najczęściej są one zdecydowanie niedoszacowane. Wynika to między innymi z faktu, że elementy łączone podczas spawania złożonych struktur są kinematycznie ustalone przez węzły sąsiednie. Sytuacja taka nie występuje podczas łączenia elementów swobodnych w prostych obiektach technicznych.
- b) W procesie projektowo-konstrukcyjnym struktur spawanych niejednokrotnie pomija się problem zmęczenia stosując prosty zabieg zwiększania wytrzymałości statycznej, który najczęściej jest nieuzasadniony, a wielokrotnie nieskuteczny, ze względu na lokalność procesu inicjacji pęknięć. Zaniedbanie w procesie konstruowania zagadnień zmęczeniowych na pierwszych etapach projektowania powoduje, że w kolejnych etapach możliwość naprawy popełnionych błędów są w znacznym stopniu utrudnione, niekiedy nawet niemożliwe.

Powodem tego są bardzo wysokie skutki ekonomiczne w zakresie kosztów wprowadzania zmian na kolejnych etapach projektowania.

- c) W stosowanych dotychczas procedurach (o ile w ogóle są stosowane), występuje głównie iteracyjne podejście: modelowanie teoretyczne, badania doświadczalne pełnych struktur aż do osiągnięcia zakładanej trwałości. Efektem takiego podejścia jest najczęściej przewymiarowanie struktury lub konieczność wielokrotnego prowadzenia kosztownych badań stanowiskowych. Należy tutaj zaznaczyć, że nie zawsze celem analizy zmęczeniowej jest osiągnięcie nieograniczonej trwałości, a jedynie zapewnienie odpowiedniej trwałości.
- d) W procesie projektowo-konstrukcyjnym złożonych obiektów najczęściej wykorzystuje się wyniki podstawowych badań materiałowych. Wyniki tych badań pozwalają w sposób ilościowy określić wpływ spoin na trwałość zmęczeniową. Programy obciążenia stosowane podczas badań próbek materiałowych czy zespołów nie zawsze uwzględniają obciążenia występujące podczas badań gotowego obiektu. Na podstawie tak uzyskanych wyników możliwości badania złożonych obiektów wykonanych z wykorzystaniem wielu połączeń są ograniczone. Efektem takiego podejścia jest najczęściej bardzo długi czas trwania badań eksperymentalnych, w których najczęściej ten sam obiekt po naprawie podlega dalszym badaniom aż do uzyskania pozytywnego wyniku.
- e) Bardzo często prowadzone podczas badań prototypu struktury spawanej naprawy prowadzą niejednokrotnie do zamiany właściwości mechanicznych. Zmianie ulega również model teoretyczny badanego obiektu. Skutkiem tego jest przewymiarowanie struktury i konieczność wielokrotnego prowadzenia kosztownych badań stanowiskowych. Przewymiarowanie jest skutkiem złożonego stanu naprężeń w okolicy złączy spawanych. W zależności od skali i charakteru obiektu stosowane są w tym celu mniej lub bardziej złożone systemy badawcze, jednak w przypadku struktur nośnych środków transportu są to najczęściej wieloosiowe stanowiska do zadawania zmiennych w czasie obciążeń odpowiadających przyjętym w procesie projektowym wymuszeniom.
- f) W wyniku przeprowadzonych testów zmęczeniowych gotowego obiektu stwierdzana jest zdolność obiektu do przenoszenia obciążeń zmiennych bez uszkodzeń. Próby prowadzone są najczęściej do wystąpienia pęknięcia w jednym lub kilku węzłach. Trudno jest w takim badaniu wyznaczyć trwałości wszystkich węzłów struktury (tzw. mapy trwałości). Wynika to z faktu, że powstające pęknięcia powodują redystrybucję obciążeń i zmieniają stan obciążenia w całej strukturze. Oznacza to, że w przypadku np. przeprowadzonych testów zmęczeniowych najczęstszym przypadkiem jest sytuacja, kiedy inny zakładany węzeł staje się węzłem krytycznym ze względu na trwałość zmęczeniową. Skutkuje to koniecznością przeprowadzenia wieloetapowego procesu iteracyjnego.
- g) Proces projektowo-konstrukcyjny złożonych obiektów technicznych jest bardzo kosztochłonny, na co składają się głównie wysokie koszty przygotowania obiektów badań do testów zmęczeniowych oraz wysokie koszty prób zmęczeniowych prowadzonych na wieloosiowych stanowiskach badawczych (zleczanych często wyspecjalizowanym jednostkom posiadającym stosowane wyposażenie i uprawnienia). Należy zaznaczyć, że ze względu na charakter zmęczenia wnioskowanie o poprawności opracowanej struktury na bazie pojedynczych prób jest obarczone sporą niepewnością co powoduje, że bardzo często istnieje konieczność przeprowadzenia co najmniej kilku powtórzeń prób zmęczeniowych.

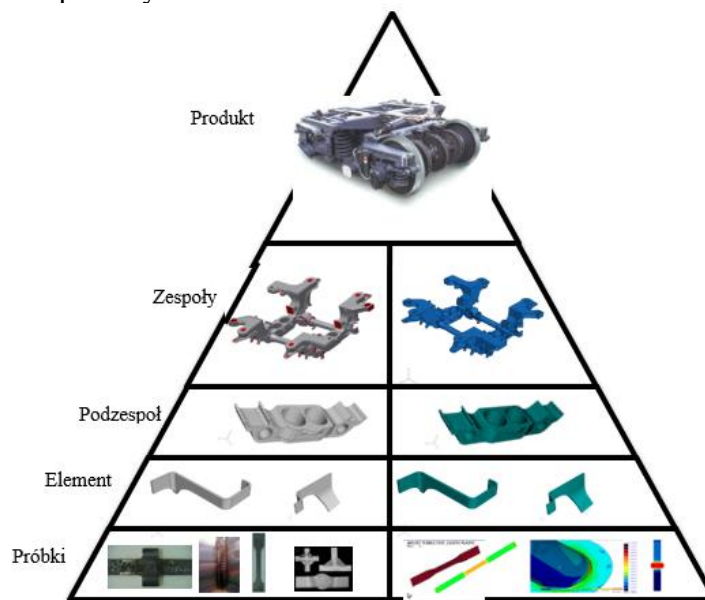
W przypadku negatywnego wyniku badania gotowego obiektu niezbędne są zmiany konstrukcyjne i przygotowanie kolejnego obiektu do badań. Dokonywane na bieżąco zmiany mają charakter intuicyjny i w rezultacie nie gwarantują końcowego sukcesu. Powoduje to istotne wydłużenie procesu projektowania i wzrost kosztów.

- h) Metody numeryczne pozwalają prowadzącym obliczenia na wiele uproszczeń i zmiany parametrów pracy, przez co prowadzi to do wrażliwości uzyskiwanych wyników od przyjętego sposobu modelowania obiektu. Pomimo znacznego rozwoju metod numerycznych wykorzystywanych w projektowaniu konstrukcji spawanych nadal podstawową metodą weryfikacji dobranych cech konstrukcyjnych gotowych wyrobów są badania kompletnych obiektów lub fragmentów konstrukcji w postaci specjalnie wykonanych węzłów. Warunki obciążenia fragmentów konstrukcji czy węzłów spawanych nie zawsze odzwierciedlają stan odkształceń i naprężeń w nich występujący podczas eksploatacji całego kompletnego obiektu.

5. Propozycja metody projektowania złożonych struktur spawanych

Na podstawie przeprowadzonej analizy doniesień literaturowych poświęconych projektowaniu spawanych obiektów technicznych można zauważyć wiele działań mających na celu doskonalenie metod projektowania, jak również wykonywania połączeń spawanych. Doskonalenie to dotyczy zarówno samej fazy projektowania, technologii spawania, jak również badań weryfikacyjnych mających na celu sprawdzenie poprawności przyjętych założeń konstrukcyjnych.

W proponowanym w poniższej pracy podejściu podstawą osiągnięcia celu procesu konstrukcyjnego ze względu na przeciwdziałanie zmęczeniowemu pękaniu jest iteracyjny proces modelowania teoretycznego - badania doświadczalnego prowadzonego na węzłach elementarnych opracowanych z zastosowaniem dekompozycji złożonej struktury. Na Rys. pokazano w sposób schematyczny przebieg postępowania w proponowanym podejściu do projektowania struktur spawanych.



Rys. 18. Dekompozycja złożonej spawanej struktury w nowej metodzie projektowania

Podobnie jak w przypadku stosowanych dotychczas rozwiązań, proces analizy zmęczeniowej rozpoczyna się od identyfikacji obciążeń obiektu z tą różnicą, że obok klasycznego podejścia bazującego na stosowaniu typowych widm obciążeń lub danych pochodzących z podobnych, istniejących wcześniej obiektów, wprowadzona zostaje możliwość wyznaczenia obciążeń w węzłach spawanych z zastosowaniem modelowania numerycznego wirtualnego obiektu i z wykorzystaniem obciążeń (sił) pochodzących od źródła wymuszeń uzyskanych w wyniku pomiarów eksperymentalnych (np. z kół pomiarowych lub czujników przyspieszeń). Takie podejście redukuje wpływ obciążeń w postaci klasycznego widma dla całego obiektu na wyniki analizy zmęczeniowej.

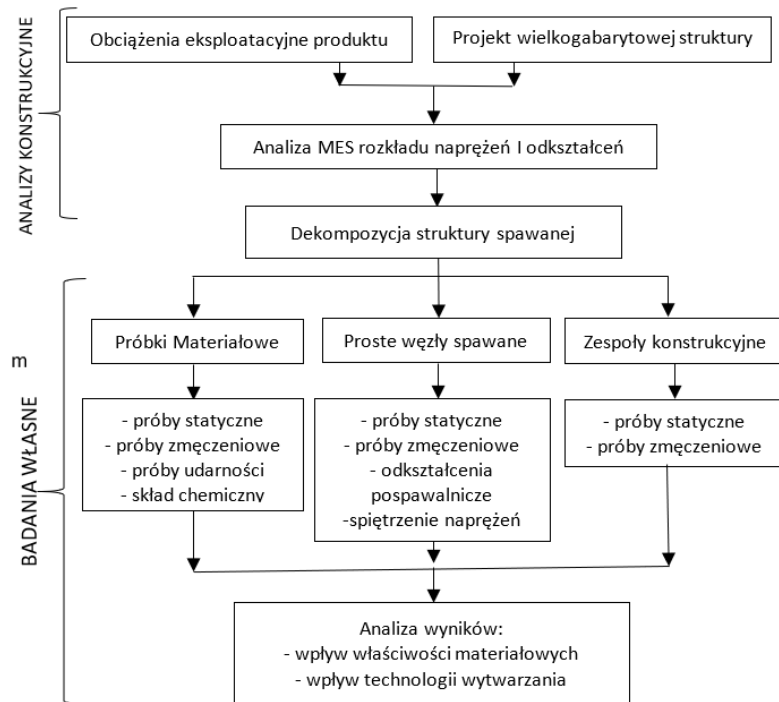
Dalszy przebieg analizy jest zbliżony do stosowanych dotychczas rozwiązań aż do fazy testów zmęczeniowych. Istotną rolę w tej fazie w przypadku proponowanego rozwiązania odgrywa skojarzenie prowadzonej analizy z bazą wiedzy stanowiącą element systemu wspomagania konstruowania, z której pobierane są modele i rozwiązania teoretyczne najbardziej adekwatne dla rozpatrywanego przypadku. Takie rozwiązanie umożliwia szybką transformację nowej wiedzy i jej transfer do zastosowań praktycznych, pamiętając jednak o tym, że tak jak przy stosowaniu każdego nowego rozwiązania konieczne jest zachowanie szczególnej ostrożności wynikającej z ich nie zawsze dostatecznej weryfikacji. Informacja o stopniu zweryfikowania modeli teoretycznych również stanowi element bazy.

Na podstawie wyznaczonych obciążeń wyznaczone są wartości naprężeń i odkształceń w analizowanej strukturze i dalej obliczane są trwałości w krytycznych, ze względu na zmęczeniowe pękanie, węzłach struktury. W odróżnieniu od klasycznego rozwiązania w dalszej fazie analizy testom zmęczeniowym nie jest poddawana cała struktura, a jedynie spawane węzły elementarne opracowane w wyniku dekompozycji złożonej struktury. Specyfika metody polega na tym, że opracowane węzły elementarne nie mają za zadanie być geometrycznym odpowiednikiem fragmentów rozpatrywanej struktury, mają natomiast w trakcie ich obciążenia odzwierciedlać wyznaczony we wcześniejszej analizie stan naprężeń i odkształceń w węzle rozpatrywanej struktury.

W wyniku przeprowadzonych testów zmęczeniowych prowadzonych w miarę możliwości na jednoosiowych maszynach (lub innych prostych stanowiskach badawczych) określana jest trwałość zmęczeniowa w wytypowanych węzłach elementarnych i, jeśli zachodzi taka potrzeba, prowadzi się kolejne iteracje modelowania - badania doświadczalne w celu uzyskania zakładanej trwałości zmęczeniowej. W przypadku konieczności weryfikacji opracowanej w ten sposób konstrukcji przeprowadza się testy weryfikacyjne na całych strukturach (np. w celu uzyskania certyfikatów lub innych potwierdzeń wymaganych prawem). Podobnie jak w rozwiązaniu klasycznym, końcowym etapem procesu jest ostateczna weryfikacja przyjętego rozwiązania w badaniach eksploatacyjnych całego obiektu.

6. Program badań własnych

Program badawczy zakładał rozpoczęcie analiz teoretycznych od próbki o największym stopniu złożoności zgodnie z piramidą przedstawioną na Rys. 18, a kończąc na próbkach o najmniejszy stopniu złożoności. Pozwoliło to zgodnie z proponowaną hipotezą na szacowanie trwałości zmęczeniowej rozpoczynając od próbek o najmniejszym stopniu złożoności a kończąc na kompletnym produkcie. Zakres i program badań przeprowadzonych w ramach rozprawy doktorskiej przedstawiono w postaci schematu blokowego na rysunku 19.



Rys. 19. Plan badań

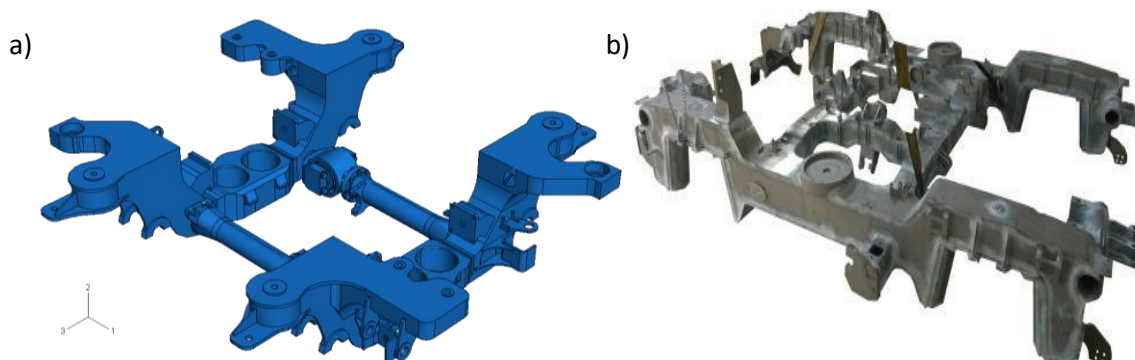
W ramach pracy przeprowadzono szczegółowo liczne badania, których opis i wyniki przedstawiono w rozprawie. Zrealizowano badania takie jak:

- badanie udarowości,
- badanie składu chemicznego,
- badanie wytrzymałości na rozciąganie próbek gładkich,
- badania niskocyklowe próbek gładkich,
- badanie jakości złączy spawanych,
- badania twardości i mikrotwardości,
- badanie wytrzymałości na rozciąganie mikropróbek pobranych ze spoiny,
- badanie wytrzymałości na rozciąganie próbek ze spoina doczołową,
- badania niskocyklowe próbek spawanych,
- badania odkształceń pospawalniczych w węzle konstrukcyjnym oraz pomiar wpływu SWC na wytrzymałość blachy głównej,
- badania spiętrzenia naprężeń wywołanego karbem geometrycznym,
- badanie spawanego węzła spawanego,
- badania próbki wielkogabarytowej - ramy wózka tramwajowego.

7. Obiekt badań

Do badań przyjęto ramę wózka pojazdu szynowego. Rama wózka to podstawowy element podwozia pojazdu szynowego. Pozwala ona poruszać się pojazdowi szynowemu po torach. Na niej zamocowane jest nadwozie pojazdu szynowego. Do budowy ram wózków stosuje się najczęściej stal konstrukcyjną niskostopową, w której obok węgla występują w niewielkich ilościach inne dodatki stopowe (do 1%), o dobrych właściwościach spawalniczych i

antykorozyjnych. W Europie najczęściej produkowane są obecnie ramy wózków spawane w formie konstrukcji skrzynkowych z pasów blachy stalowej i profili stalowych. Na rysunku 20 pokazano widok próbki wielkogabarytowej.



Rys. 201. Obiekt wielkogabarytowy: a) model, b) próbka rzeczywista

Próbka wielkogabarytowa została zdekomponowana zgodnie z rysunkiem 18. Proces zdekompozycji pozwolił na stworzenie próbek referencyjnych na kilku poziomach złożoności wynikających z podziału na *Produkt*, *Zespół*, *Podzespół*, *Element* i *Próbki*. Zdekomponowane obiekty pozwoliły na zrealizowanie badań materiałowych (Rys. 19). Wszystkie próbki były wykonane ze stali S355J2+N.

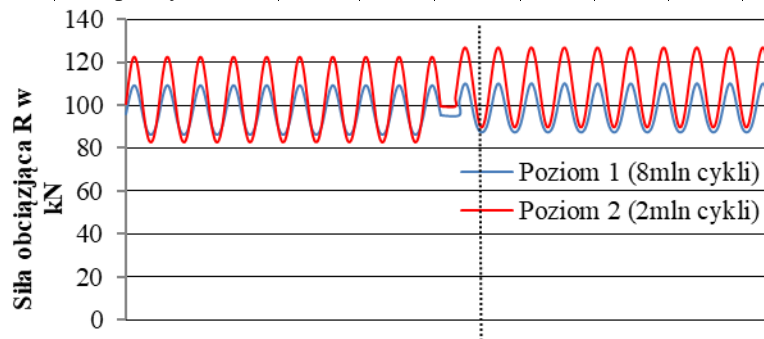
7. Zakres badań, wyniki i ich analiza

Prace badawcze rozpoczęto od przeprowadzenia badań podstawowych, które miały na celu wyznaczenie właściwości wytrzymałościowych niezbędnych na początkowym etapie analiz prowadzonych z wykorzystaniem MES. Następnie przeprowadzone zostały badania obejmujące swym zakresem analizy prostych węzłów spawanych, analizy średnich obiektów badawczych i na końcu przeprowadzono badanie na próbce wielkogabarytowej.

Ze względu na niedoprowadzenie do zniszczenia próbek *Zespołu* i *Podzespołu* zaproponowano metodykę umożliwiającą przeprowadzenie analizy uzyskanych wyników przy założeniu projektowej trwałości *Produktu* wynoszącej 10 mln cykli obciążenia składającego się z bloków obciążenia zgodnych z Tab. 3 i Rys 21. Wartość trwałości projektowej jest punktem odniesienia, z którym są porównywane uzyskane szacowane trwałości próbek. W metodach obliczeń trwałości zmęczeniowej bazujących na analizie odkształceń szacowana trwałość jest bezpośrednio związana z odkształceniami dla naprężeń na dnie karbu σ_{lok} , jakie występują w karbie będącym inicjatorem pęknięcia.

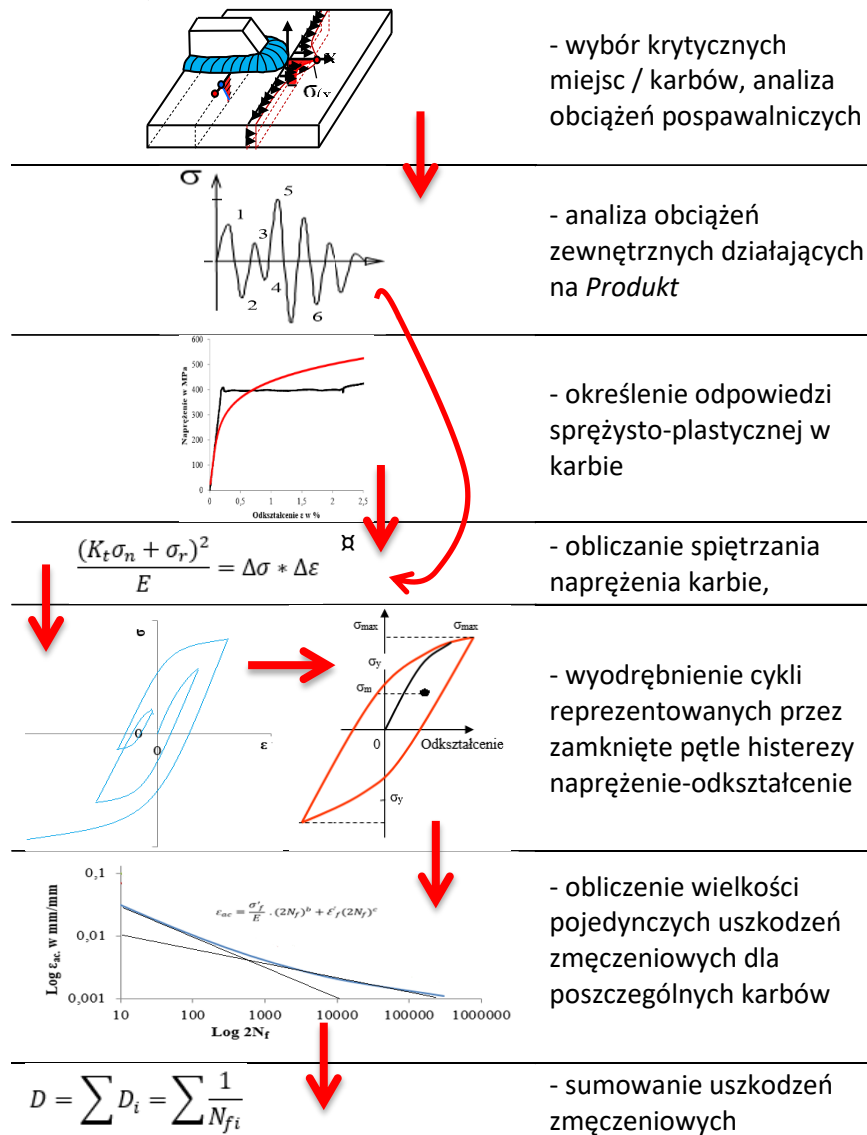
Tab. 3. Wartości sił obciążających ramę w procesie badawczym (zwrot sił dodatni – ściskanie, ujemny – rozciąganie)

Obciążenia		Fz1		Fz2		Fy		Fx	
		kN							
		F _m	F _{amp}	F _m	F _{amp}	F _m	F _{amp}	F _m	F _{amp}
Poziom obciążenia 1	Blok 1- Zwrotnica + łuki	135,5	21	135,5	12,5	0	32	0	110
	Blok 2 - Nabieganie + prosty tor	135,5	12,5	135,5	21	0	110	0	42,5
Poziom obciążenia 2	Blok 1- Zwrotnica + łuki	142,5	32,5	142,5	25	0	32	0	22
	Blok 2 - Nabieganie + prosty tor	150	25	150	25	0	22	-15	32



Rys. 21. Przebieg programu obciążenia dla węzła

Na rysunku 22 pokazano przyjętą metodykę podejścia do szacowania trwałości zmęczeniowej złożonych struktur spawanych w której istotne jest określenie odkształcenia materiału wywołanego spiętrzeniem naprężeń w karcie jakim jest złącze spawane.



Rys. 22. Schemat przyjętej metody obliczeniowej stopnia uszkodzenia D

Zgodnie z przyjętą metodyką oprócz opisu zmian odkształceń ϵ_{ac} , ϵ_{ac} w funkcji liczby cykli dla materiału z jakiego wykonane są obiekty badań potrzebny jest opis śpiętrzenia naprężeń występujących w korbie. W powszechnym użyciu występuje kilkanaście metod wyznaczania stopnia śpiętrzenia naprężeń. Jedną z najbardziej popularnych jest metoda w której wykorzystuje się współczynnik kształtu karbu Neuber'a. W metodzie tej uzależnia się wartość naprężenia lokalnego w korbie od nominalnego wykorzystując współczynnik śpiętrzenia odkształceń i współczynnik śpiętrzenia naprężeń. Powyższe przedstawiono w równaniu Neuber'a w którym kwadrat współczynnika kształtu karbu K_t oblicza się jako iloczyn współczynnika K_σ i K_ϵ .

$$K_t^2 = K_\sigma \cdot K_\varepsilon \quad 7.1$$

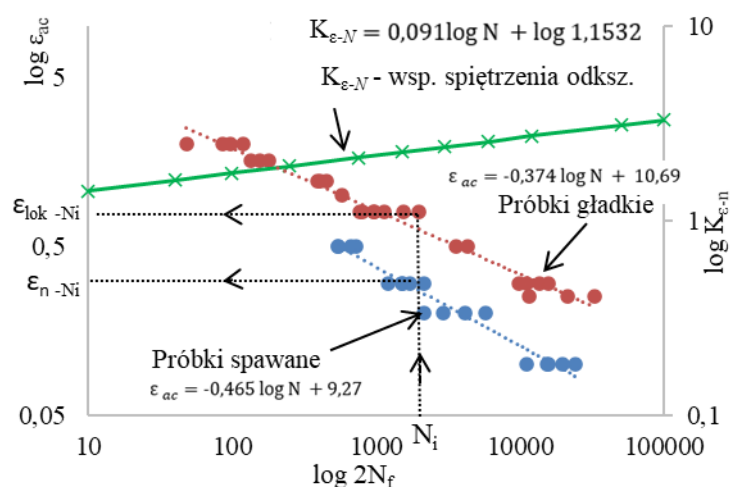
Na potrzeby prowadzonych analiz równanie Neuber'a zostało uzupełnione o zebrane dane z badań próbek wiosełkowych ze spoiną, próbek gładkich i „Hot Spot”. Równanie Neuber'a składa się dwóch równań opisujących spiętrzenie naprężeń K_σ i odkształceń K_ε .

Współczynnik spiętrzenia naprężeń K_σ wyznaczono korzystając z wyników analizy „Hot Spot” jedynie dla obciążeń dodatnich będących główną przyczyną pęknięcia konstrukcji spawanych. Za naprężenia lokalne przyjęto średnią wartość naprężeń „Hot Spot” $\sigma_{lok} = 330,8$ MPa a za naprężenia normalne przyjęto średnią wartość naprężeń wykorzystywanych do zadawania obciążenia w analizach „Hot Spot” $\sigma_n = 189,6$ MPa.

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{lok}}{\sigma_n} = 1,82 \quad 7.2$$

Chcąc uwzględnić zmiany właściwości materiału w czasie, współczynnik spiętrzenia odkształceń K_ε wyznaczono poprzez zestawianie ze sobą odkształceń próbek z karbem (ze spoiną) i odkształceń próbek gładkich dla tych samych poziomów liczby cykli obciążenia N_i , wyznaczonej we wcześniejszych badaniach. Na rysunku 23Rys. przedstawiono sposób wyznaczenia współczynnika $K_{\varepsilon-N}$ będącego współczynnikiem spiętrzenia odkształceń zależnym od liczby cykli obciążenia N_i .

$$K_{\varepsilon-N} = \frac{\varepsilon_{lok-N_i}}{\varepsilon_{n-N_i}} \quad 7.3$$



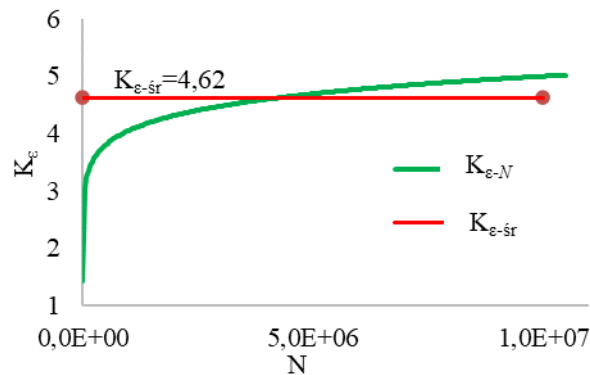
Rys. 23. Schemat wyznaczania funkcji opisującej współczynnik spiętrzenia odkształceń

Dodatkowo w celu porównania uzyskanych wyników wyznaczono wartość średnią współczynnika spiętrzenia odkształceń $K_{\varepsilon-śr}$ o wartości nieziennej w funkcji liczby cykli

obciążenia N_i . W celu wyznaczenia tego współczynnika przyjęto taką samą liczbę realizowanych cykli obciążenia jak dla projektowej trwałości *Produktu*, $N = 10$ mln cykli.

$$K_{\varepsilon-\dot{\varepsilon}r} = \frac{\int_0^N K_{\varepsilon-N}}{N} = 4,62 \quad 7.4$$

Graficznie porównano przebiegu $K_{\varepsilon-N}$ i $K_{\varepsilon-\dot{\varepsilon}r}$ przedstawiono na rysunku 24. Na podstawie wykonanych wykresów można stwierdzić, że w celu ułatwienia obliczeń można stosować $K_{\varepsilon-\dot{\varepsilon}r}$, jednakże należy mieć na uwadze fakt, że zostało ono wyznaczone dla cykli obciążenia o amplitudzie nieziennej w czasie. Dlatego też w celu uzyskania możliwie wysokiej jakości prowadzonych analiz zaleca się używanie współczynnika uzależnionego od liczby cykli $K_{\varepsilon-N}$.



Rys. 24. Zmiana współczynnika śpiętrzenia odkształceń $K_{\varepsilon-N}$ w zależności od liczby cykli

W kolejnym etapie analiz wyznaczono wartość współczynnika kształtu karbu K_t o stałej wartości, niezależnionej od liczby cykli $K_{t-\dot{\varepsilon}r}$.

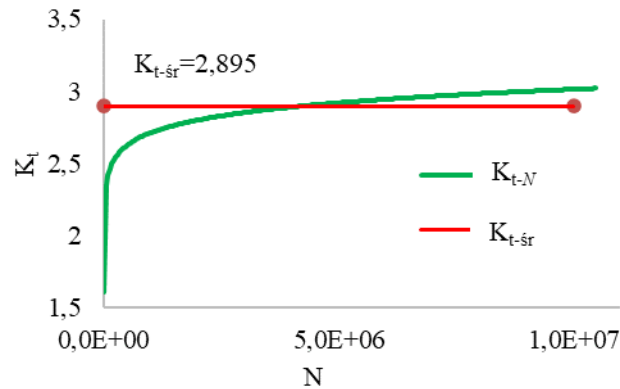
$$K_{t-\dot{\varepsilon}r}^2 = K_{\sigma} \cdot K_{\varepsilon-\dot{\varepsilon}r} = 2,895 \quad 7.5$$

W przedstawionej analizie współczynnik kształtu wg Neuber'a jest pochodną współczynnika śpiętrzenia naprężeń wyznaczonym na podstawie metody „Hot Spot” i na współczynnika śpiętrzenia odkształceń bazującym na odkształceniach dla próbek gładkich i dla próbek ze spoiną. Mimo znacznego uproszczenia analiz opartych o $K_{t-\dot{\varepsilon}r}$ mającego stałą wartość w przedziale do $N = 10$ mln cykli w dalszych rozważaniach stosowano K_{t-N} , który przy obciążeniu o zmiennej amplitudzie i zmiennym programie badawczym zapewnia uzyskanie wyników bardziej zbliżonych do rzeczywistych.

Wynikową postać zależności opisującej zmodyfikowany współczynnik kształtu karbu zależny od liczby cykli K_{t-N} przedstawiono za pomocą zależności

$$K_{t-N} = \sqrt{K_{\sigma} \cdot K_{\varepsilon-N}} = \sqrt{1,82 \cdot 10^{0,091 \log N + \log 1,1532}} \quad 7.6$$

Porównanie graficzne współczynników K_{t-N} i $K_{t-śr}$ przedstawiono na rysunku 25.



Rys. 25. Zmiana współczynnika kształtu karbu K_{t-N} w liczbie cykli

Wyniki badań węzła spawanego (*Podzespołu*) i wielkogabarytowej ramy tramwajowej (*Zespołu*) opracowano wykorzystując hipotezę sumowania uszkodzeń Palmgrena-Minera:

$$D = \sum D_i = \sum \frac{1}{N_{fi}} \quad 7.7$$

Stopień uszkodzenia D wyznaczano z wykorzystaniem trzech modeli obliczeniowych. Najprostszym był: model Mansona-Coffin'a **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.** oraz dwa modele uwzględniające naprężenia średnie - model Morrow'a i model Mansona-Halford'a.

Mansona-Coffina-Basquina:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{ac}}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_{ae}}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_{ap}}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad 7.8$$

Morrowa:

$$\varepsilon_{ac} = \frac{(\sigma_f' - \sigma_m)}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad 7.9$$

Mansona-Halford'a

$$\varepsilon_{ac} = \frac{(\sigma_f' - \sigma_m)}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' \frac{(\sigma_f' - \sigma_m)^{\frac{c}{b}}}{\sigma_f'} (2N_f)^c \quad 7.10$$

W prowadzonych analizach dla wszystkich modeli obliczeniowych uwzględniano:

- zmienny współczynnik kształtu Neuber'a zależny od stopnia uszkodzenia, opisany zależnością:

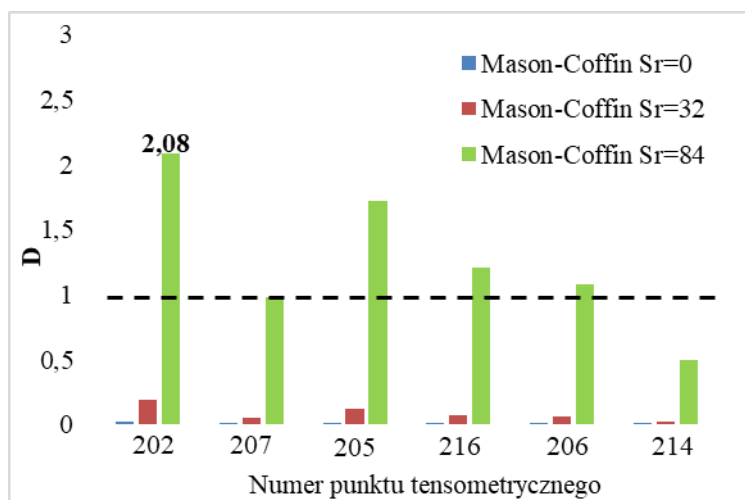
- kształtu karbu zależny od liczby cykli K_{t-N} przedstawiono za pomocą zależności

$$K_{t-N} = \sqrt{K_{\sigma} \cdot K_{\varepsilon-N}} = \sqrt{1,82 \cdot 10^{0,091 \log N + \log 1,1532}} \quad 7.11$$

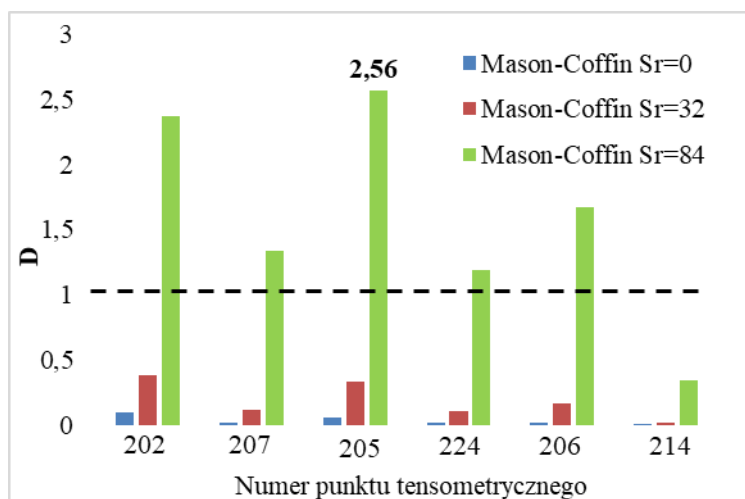
- poziom amplitudy odkształcenia wyznaczone w trakcie badań laboratoryjnych na poziomie dekompozycji *Zespołu* i *Podzespołu*,
- poziom naprężeń średnich analizowany dla trzech poziomów: $\sigma_r = \sigma_m = 0$ MPa (brak naprężeń), $\sigma_m = 32$ MPa (naprężenia po wibroodprężaniu), $\sigma_m = 84$ MPa (naprężenia pospawalnicze maksymalne),
- parametry pętli histerezy materiału wyznaczano na podstawie modelu Ramberga-Osgooda dla $n/N=0,5$,
- podstawowe dane materiałowe wyznaczone podczas badań zmęczeniowych.

Na rysunku 26 i 27 przedstawiono stopnie uszkodzenia D odniesione do projektowej trwałości $N = 10$ mln cykli ograniczone jedynie do modelu Mansona-Coffin'a. Uzyskane maksymalne wartości wyników wahają się od ok. 2,08 (Rys. 25) dla *Podzespołu* i 2,56 (Rys. 26Rys.) dla próbki ramy z poziomu dekompozycji *Zespołu*.

Porównanie wyników ilustruje wpływ charakteru obciążenia i zastosowanego modelu na uzyskane wyniki, na co ma wpływ przede wszystkim uwzględniony poziom naprężenia średniego.



Rys. 26. Porównanie stopnia uszkodzenia dla 10^7 cykli obciążenia próbki węzła dla czujników tensometrycznych: 202, 207, 205, 216, 206, 214



Rys. 27. Porównanie stopnia uszkodzenia dla 10^7 cykli obciążenia próbki ramy dla punktów pomiarowych: 202, 207, 205, 224, 206, 214

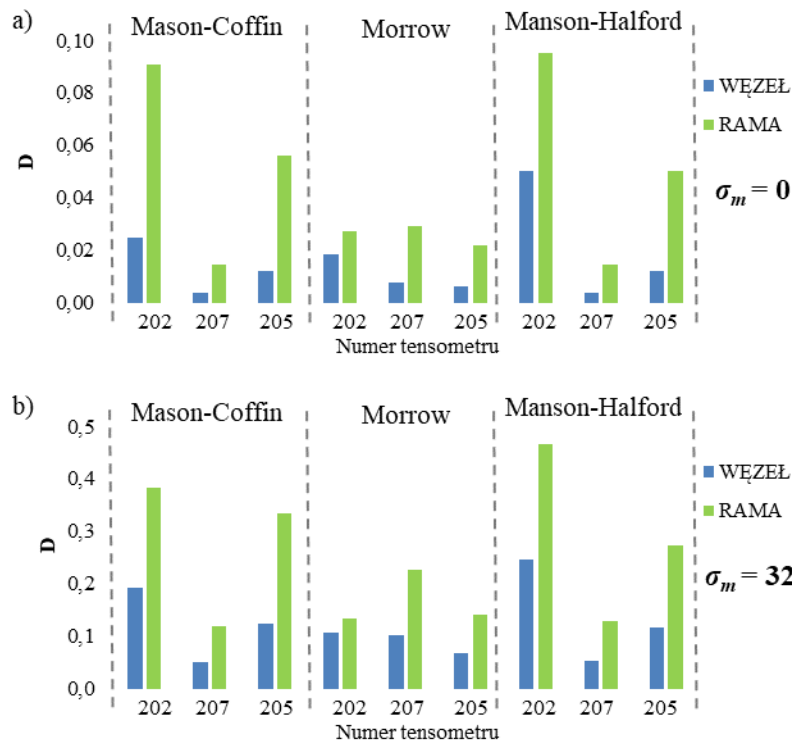
Dalsze analizy stopni uszkodzenia realizowano jedynie dla trzech punktów pomiarowych (202, 207 i 205) przyjętych jako najistotniejsze spośród niemal stu kanałów pomiarowych (Tabela 3). Wszystkie wyniki obliczeń stopnia uszkodzenia D przekraczające wartość 1 świadczą o tym, że obiekty nie osiągną projektowej trwałości zmęczeniowej. Wyniki uzyskane dla wybranych punktów pomiarowych charakteryzujących się największą wartością obciążenia są porównywalne dla próbek z obu poziomów dekompozycji. Można również stwierdzić, że dla wszystkich trzech modeli uzyskane wyniki są porównywalne dla obu próbek, a różnice pomiędzy uzyskanymi wynikami dla próbki *Podzespołu* i *Zespołu* zwiększają się znacząco wraz ze zwiększaniem poziomu naprężenia średniego (naprężenia pospawalnicze). Zauważyć należy, że według obliczeń dla wszystkich trzech modeli przy najwyższym poziomie naprężenia średniego równego 84 MPa stopień średniego uszkodzenia w przypadku *Podzespołu* (węzła spawanego) nie różni się od siebie w istotny sposób (Tabela 3). Największy stopień uszkodzenia dla obu rodzajów próbek zaobserwować można dla opisu według modelu Mansona-Coffin'a.

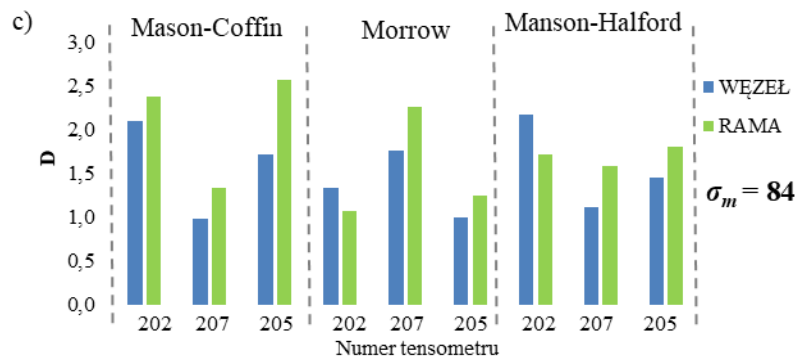
Tab. 3. Wyniki stopnia uszkodzenia D dla 10 mln cykli obciążenia

σ_m MPa	Model	Stopień uszkodzenia D_{sr} ($N = 10^7$ cykli)								
		Podzespół	Zespół	δ_D	Podzespół	Zespół	δ_D	Podzespół	Zespół	δ_D
0	Tens. nr.	202			207			205		
	Mason-Coffin	0,025	0,091	3,6	0,004	0,056	14	0,012	0,056	4,7
	Morrow	0,018	0,028	1,6	0,008	0,022	2,8	0,006	0,022	3,7
	Manson-Halford	0,050	0,095	1,9	0,004	0,050	12	0,012	0,050	4,2
32	Tens. nr.	Podzespół	Zespół	δ_D	Podzespół	Zespół	δ_D	Podzespół	Zespół	δ_D
		202			207			205		
	Mason-Coffin	0,193	0,382	2,0	0,052	0,335	6,4	0,125	0,335	2,7
	Morrow	0,108	0,134	1,2	0,102	0,142	1,4	0,067	0,142	2,1
	Manson-Halford	0,246	0,467	1,9	0,054	0,272	5,0	0,116	0,272	2,3

	Tens. nr.	Podzespól	Zespól	δ_b	Podzespól	Zespól	δ_b	Podzespól	Zespól	δ_b
		202			207			205		
84	Mason-Coffin	2,088	2,376	1,1	0,982	2,565	2,6	1,715	2,565	1,5
	Morrow	1,339	1,072	0,8	1,752	1,249	0,7	1,001	1,249	1,2
	Manson-Halford	2,171	1,706	0,8	1,107	1,800	1,6	1,447	1,800	1,2

Wyniki badań dotyczą próbek poddanych wibroodprężaniu, z tego powodu najistotniejszymi wynikami analiz są wyniki dla wartości $\sigma_m=32$ MPa (Rys. 28b). Pozostałe wyniki przedstawione na rysunku są jedynie hipotetycznymi wynikami, służącymi jako punkty odniesienia. Przy wykorzystaniu modeli obliczeniowych Mansona-Coffina i Mansona-Halforda, punkty pomiarowe 202 i 205 po zrealizowaniu programu obciążenia przekraczają stopień uszkodzenia $D=2$. Taki sam wynik uzyskany jest w punkcie 207 dla modelu obliczeniowego Morrowa. Uzyskane stopnie uszkodzenia świadczą o tym, że gdyby obiekty badawcze nie były poddane zabiegowi wibroodprężania, to *Produkt* nie uzyskałby zakładanej trwałości projektowej. Ponadto można stwierdzić, że w przypadku dalszej redukować wartość naprężeń pospawalniczych do wartości bliskiej zera stopień uszkodzenia po zrealizowaniu 10 mln cykli obciążenia mógłby ulec dalszemu znacznemu obniżeniu do poziomu $D=0,02$ dla punktu pomiarowego 202 i $D<0,02$ dla pozostałych punktów (Rys. 28a).





Rys. 28. Zestawienie uzyskanych wyników stopnia uszkodzenia dla wybranych punktów pomiarowych w oparciu o próbki dla dwóch stopni dekompozycji

Na podstawie analizy stopnia uszkodzenia D dla $\sigma_m=32$ MPa dla wszystkich trzech modeli obliczeniowych można stwierdzić, że rzeczywista próbka węzła spawanego (*Podzespołu*) uległa uszkodzeniu dla stopnia uszkodzenia mieszczącego się w przedziale $0,052 < D < 0,246$, a próbka ramy spawanej (*Zespołu*) od $0,134 < D < 0,467$ (Tab. 3). Świadczy to o przewymiarowaniu całego *Produktu* i o zadowalającej zbieżności dla wyników *Podzespołu* i *Zespołu*.

Na podstawie danych zestawionych w tabeli 3 jak również na rysunku 28 można stwierdzić, że na osiągnięty stopień uszkodzenia D bardzo istotny wpływ ma wartość średnia naprężeń σ_m . Powyższe dotyczy zarówno wyników uzyskanych z wykorzystaniem modelu obliczeń odkształceń, w którym nie uwzględnia się tych naprężeń (Mansona-Coffina) jak również dwóch modeli, w których to naprężenie zostaje uwzględnione (Morrowa oraz Mansona-Halforda). Wykazany wpływ naprężenia średniego na wartość stopnia uszkodzenia D , spowodowanego np. spawaniem potwierdza konieczność stosowania po spawaniu zabiegów mających na celu obniżenie naprężeń spawalniczych lub ich całkowite usunięcie. Skutkiem braku naprężeń średnich ($\sigma_m = 0$ - wariant mało realny) jest to, że dla bazowej liczby cykli obciążenia ($N = 10$ mln. cykli) maksymalny stopień uszkodzenia D w najbardziej krytycznym węźle (tensometr 202) jest 10 razy mniejszy od dopuszczalnego ($D = 1$). Używając terminologii projektowej można powiedzieć w tym przypadku o „przewymiarowaniu” konstrukcji. Ze zrozumiałych względów „przewymiarowanie” jest już zdecydowanie mniejsze w przypadku naprężeń średnich $\sigma_m = 32$ MPa. Suma uszkodzeń w rozpatrywanym punkcie tensometrycznym (tensometr 202) jest tylko dwa razy mniejsza od dopuszczalnej ($D = 1$). Natomiast dla naprężeń średnich $\sigma_m = 84$ MPa stopień uszkodzenia w tym punkcie jest prawie dwa razy większy od dopuszczalnego. Skutkiem tego przewidywana trwałość węzła jak i ramy jest prawie dwa razy mniejsza od zakładanej bazowej liczby cykli (10 mln cykli). Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że gdyby obiekty badawcze nie były poddane zabiegowi wibroodprężania, to *Produkt* nie uzyskałby zakładanej trwałości projektowej.

Na podstawie przedstawionych wyników trudno wskazać model obliczeniowy, który cechuje największą skuteczność i polecać go jako najbardziej bezpieczny. Z pewnością skuteczność analizowanych modeli należałoby analizować w zależności od poziomu naprężenia średniego, jak również poziomu naprężeń zmiennych w analizowanym punkcie tensometrycznym. Na widoczne różnice stopni uszkodzenia wpływ mogło mieć bardzo wiele czynników związanych zarówno z procesem klejenia tensometrów, pomiarów odkształceń, jednorodnością węzłów spawanych itp. Stwierdzenie takie wymagałoby przeprowadzenia zdecydowanie większej liczby badań zarówno gotowych obiektów jak również węzłów.

8. Podsumowanie

W ramach w pracy doktorskiej zrealizowany został bardzo szeroki program badań zmęczeniowych w zróżnicowanych warunkach obciążenia z wykorzystaniem prostych próbek materiałowych, jak również specjalnie przygotowanych węzłów spawanych charakteryzujących się dużym poziomem złożoności. W ramach pracy przeprowadzono kilkadziesiąt testów zmęczeniowych w warunkach obciążeń monotonicznych, zmęczeniowych oraz programowanych. Niektóre z uzyskanych wyników i spostrzeżeń nie były objęte zakresem badań. Z tego też względu prezentowane w poniższej pracy niektóre wyniki przedstawiono jedynie w formie informacji o działaniach podjętych zgodnie z planem, jak również dodatkowo o napotkanych problemach badawczych. Z oczywistych względów uzyskane wyniki i bardzo bogata baza zarejestrowanych na nośnikach cyfrowych wyników długotrwałych i kosztownych prób zmęczeniowych będzie podstawą dalszych opracowań i analiz celem przygotowania artykułów naukowych na etapie dalszego rozwoju naukowego autora pracy, jak również zespołu zaangażowanego podczas badań eksperymentalnych.

Na podstawie analizy wyników niskocyklowych badań zmęczeniowych w zróżnicowanych warunkach obciążenia potwierdzono, że obecnie wśród parametrów pętli histerezy wykorzystywanych podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych brak parametrów niewrażliwych na zmiany właściwości cyklicznych materiałów, z których wykonywane są te elementy. Wielkość zmian właściwości cyklicznych obserwowanych podczas badań zmęczeniowych zależy zarówno od samych parametrów pętli histerezy przyjętych do oceny tych zmian, jak również warunków badań identyfikowanych na przykład poziomem odkształcenia.

Jednym z podstawowych efektów pracy jest opracowanie założeń i doświadczalna weryfikacja nowej metody projektowania złożonej struktury spawanej. Doświadczalną weryfikację przeprowadzono z wykorzystaniem unikalnej aparatury badawczej będącej na wyposażeniu Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji UTP w Bydgoszczy. Do wyposażenia należy zaliczyć standardowe maszyny wytrzymałościowe, jak również stanowiska do badań kompletnych ram wózków pojazdów szynowych w warunkach odzwierciedlających warunki ich eksploatacji. W stanowisku badawczym zostały zastosowane najnowsze rozwiązania z zakresu sterowania, automatyki, pomiaru, rejestracji oraz wizualizacji wyników badań. Należy nadmienić, że uzyskane w ramach pracy doktorskiej wyniki zostały w dużej mierze wykorzystane w przedsiębiorstwie PESA Bydgoszcz S.A.