ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Michał Piotrowski

BADANIA I OBLICZENIA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ZŁOŻONYCH STRUKTUR SPAWANYCH

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH DYSCYPLINA INŻYNIERIA MECHANICZNA

PROMOTOR PROF. DR HAB. INŻ. STANISŁAW MROZIŃSKI

BYDGOSZCZ 2021

Spis treści

1. Wprowadzenie7
1.1. Wstęp 7 1.1.1. Teza pracy 10 1.1.2. Cel pracy 10
1.1.3. Zakres pracy 11
2. Zmęczenie konstrukcji spawanych
2.1. Geneza pęknięć zmęczeniowych 12
2.2. Naprężenia spawalnicze162.2.1. Wprowadzenie162.2.2. Powstawanie naprężeń spawalniczych182.2.3. Metody określania naprężeń spawalniczych202.2.4. Wpływ naprężeń spawalniczych na pękanie zmęczeniowe242.2.5. Redukcja naprężeń spawalniczych272.2.6. Metody poprawy trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych30
 2.3. Metody analizy trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych
 2.4. Wpływ spoin na właściwości mechaniczne obiektu
 2.5. Krytyczna ocena obecnego stanu wiedzy
2.5.3. Uwagi odnoszące się do projektowania struktur spawanych 73
2.6. Metoda projektowania złożonych struktur spawanych
3. Analizy i badania własne

3.1. Cel, program i opis badań własnych	'8
<i>3.2.Obiekt badań</i>	'9
3.3.Analizy i Dekompozycja Produktu 8	2
3.4. Badania właściwości mechanicznych i chemicznych	0
3.4.1. Badanie udarności9	1
3.4.2. Badania i składu chemicznego	13
3.4.3. Badania wytrzymałości na rozciąganie próbek gładkich 9	3
3.4.4. Badania niskocyklowe próbek gładkich	95
3.4.5. Badanie jakości złącz spawanych9	8
3.4.6. Badania wytrzymałości na rozciąganie mikropróbek pobranych	ı
ze spoiny doczołowej9	8
3.4.7. Badania wytrzymałości na rozciąganie próbek spawanych 10)1
3.4.8. Badania niskocyklowe próbek spawanych 10)3
3.4.9. Badanie odkształceń pospawalniczych w węźle konstrukcyjnym	L
oraz pomiar wpływu bliskości SWC na wytrzymałość blachy	
głównej w tym samym węźle10	6
3.4.10. Badania spiętrzenia naprężeń wywołanego karbem	
geometrycznym jakim jest złącze spawane - hotspot 11	1
3.4.11. Badanie spawanego węzła konstrukcyjnego 11	5
3.4.12. Badanie próbki wielkogabarytowej - ramy wózka tramwajowego)
	8
3.5. Wyniki badań własnych 12	21
3.5.1. Wyniki badania udarności 12	1
3.5.2. Wyniki badań składu chemicznego 12	3
3.5.3. Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie próbek gładkich	
	:5
3.5.4. Wyniki badań niskocyklowych próbek gładkich 12	9
3.5.5. Wyniki badania jakości złączy spawanych 13	7
3.5.6. Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie mikropróbek	
pobranych ze spoiny doczołowej 13	8
3.5.7. Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie próbek spawanych	
	9
3.5.8. Wyniki badania niskocyklowego próbek spawanych 14	-1
3.5.9. Wyniki badań odkształceń pospawalniczych w węźle	
konstrukcyjnym oraz pomiar wpływu bliskości SWC na	
wytrzymałość blachy głównej w tym samym węźle 14	.5

3.5.10. Wyniki badania spiętrzenia naprężeń wywołanego karbem
3.5.11. Wyniki badania spawanego węzła konstrukcyjnego 150
3.5.12. Wyniki badania próbki wielkogabarytowej ramy wózka
tramwajowego156
3.6.Analiza wyników159
4. Podsumowanie i wnioski
4.1. Wnioski
4.2. Wytyczne do dalszych badań
Literatura
Streszczenie
Załącznik nr 1 184

SPIS WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- E moduł Young'a,
- K' współczynnik wytrzymałości cyklicznej,
- n' wykładnik cyklicznego umocnienia,
- σ_{cp} cykliczna granica plastyczności,
- K_t współczynnik kształtu karbu / koncentracji naprężeń,
- K_{σ} współczynnik koncentracji naprężeń,
- K_{ε} współczynnik koncentracji odkształceń,
- σ_r naprężenia pospawalnicze,
- σ_f' współczynnik wytrzymałości zmęczeniowej,
- ε_f' współczynnik plastyczności zmęczeniowej,
- $2N_f$ liczba nawrotów,
 - b wykładnik wytrzymałości zmęczeniowej,
 - c wykładnik plastyczności zmęczeniowej,
 - *D* suma uszkodzeń zadanych przez zmęczeniowe obciążanie dla jednego punktu pomiarowego,
- L_R liczba powtórzeń bloku obciążenia,
- ε_r odkształcenie odpuszczenia zmierzone w punkcie naklejenia tensometru,

- A, B stałe kalibracyjne,
- σ_{max} maximum naprężenia w cyklu obciążenia zmęczeniowego,
- σ_{min} minimum naprężenia w cyklu obciążenia zmęczeniowego,
 - β kierunek główny tensora naprężeń mierzony zgodnie z ruchem wskazówek zegara,
- *P*, *T*, *Q* naprężenia w trzech głównych kierunkach obliczone na podstawie trzech tensorów odkształcenia,
 - $\Delta \sigma_i z$ akres naprężenia w *i*-tym cyklu obciążenia,
 - $\Delta \sigma_1$ zakres naprężenia w pierwszym cyklu obciążenia,
 - $R_{m(i)}$ wytrzymałość na rozciąganie próbek materiału z obszaru wpływów cieplnych (próbki nr 1-11),
 - $R_{m(R)}$ wytrzymałość na rozciąganie materiału rodzimego (bez wpływów cieplnych (próbka nr 12),
 - \mathcal{E}_{lok} odkształcenie w karbie,
 - ε_n odkształcenie normalne,
 - σ_n naprężenia normalne,
 - σ_r naprężenia pospawalnicze,
 - σ_{lok} naprężenia lokalne,
 - σ_m naprężenia normalne rozciągające -membrany,
 - σ_g naprężenia normalne gnące.

SPIS WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW

- MMA spawanie elektrodą otuloną SMAW,
 - TIG spawanie elektrodą nietopliwą w osłonie gazów obojętnych GTAW,
- MAG spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazów aktywnych FACW,
- MIG spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazów obojętnych GMAW,
- MEB metoda elementów brzegowych,
- MES metoda elementów skończonych FEM,
- IIW międzynarodowy Instytut Spawalnictwa,
- SWC strefa wpływu ciepła HAZ.

1. WPROWADZENIE

1.1. WSTĘP

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.

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 własności 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.

Podczas klasycznego projektowania środków transportu szynowego czy morskiego są one wymiarowane w oparciu o wartości obciążeń maksymalnych, statycznych. Możliwości optymalizowania konstrukcji z wykorzystaniem metod numerycznych spowodowały znaczne zredukowanie wcześniej przyjętych współczynników bezpieczeństwa. Podczas procesu optymalizacji zaniedbane zostały zjawiska zmęczenia, które towarzyszą eksploatacji złożonych konstrukcji spawanych, do których należą pojazdy szynowe, statki, maszyny robocze. Obciążenia zmęczeniowe tych obiektów wynikają głównie z oddziaływania podłoża oraz rodzaju i ilości przewożonego ładunku.

Problematyka występowania uszkodzeń zmęczeniowych obiektów technicznych występuje w procesie projektowo-konstrukcyjnym obok wielu innych ważnych zagadnień. Ze względu na możliwe skutki powstałych awarii zagadnienia zmęczenia materiału w wielu przypadkach nabierają szczególnego znaczenia. Dotyczy to między innymi techniki lotniczej, morskiej, transportowej, nuklearnej, w której uszkodzenia prowadzą do poważnych w skutkach katastrof [1], [2]. Na różnych etapach procesu projektowego pomiędzy takimi zagadnieniami jak bezpieczeństwo, ekonomia, niezawodność, masa zachodzi wiele związków i sprzężeń zwrotnych. Ostateczne rozwiązania zadania konstrukcyjnego i decyzje podejmowane na poszczególnych etapach

projektowania są efektem przeprowadzonej optymalizacji i przyjętych wag dla poszczególnych kryteriów oceny. W związku z tym ostateczne rozwiązanie zadania konstrukcyjnego nie zawsze jest najlepsze ze względu na wszystkie przyjęte kryteria oceny.

Pojawiające się złożonych obiektach technicznych (pojazdy szynowe, statki, samoloty) pęknięcia zmęczeniowe mają najczęściej charakter zmęczeniowy. Przyjmuje się, że trwałość zmęczeniowa tego typu obiektów jest wypadkową pięciu podstawowych grup czynników (Rys. 1). 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 pękania zmęczeniowego.



Rys. 1. Czynniki wpływające na trwałość zmęczeniową [3]

Procesy zmęczenia mają odmienny przebieg dla metali i ich stopów, materiałów ceramicznych, kompozytowych i tworzyw sztucznych. Wymieniona różnorodność procesów zmęczenia i ich złożony, probabilistyczny charakter powoduje, że brak aktualnie spójnej teorii zmęczenia materiałów i zmęczeniowego pękania konstrukcji [4]. W matematycznych modelach znajdują zastosowanie elementy teorii: sprężystości, plastyczności oraz mechaniki pękania. W opisanej sytuacji nauka o zmęczeniu materiałów i zmęczeniowym pękaniu konstrukcji jest nauką eksperymentalną opartą na wynikach badań doświadczalnych prowadzonych w świecie na szeroką skalę. Wyniki te stanowią podstawę do formułowania hipotez zmęczenia materiałów, spośród których praktyczne znaczenie w obliczeniach trwałości zmęczeniowej obiektów narażonych na zmęczeniowe pękanie mają hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych o charakterze fenomenologicznym [5–7]. Hipotezy te podlegają weryfikacjom oraz kolejnym modyfikacjom [8].

Analiza zagadnień zmęczeniowych występujących podczas eksploatacji znajduje swoje odzwierciedlenie we wszystkich etapach procesu projektowokonstrukcyjnego. Zaniedbanie w tym procesie zagadnień zmęczeniowych na jego pierwszych etapach powoduje, że w kolejnych możliwości naprawy popełnionych błędów są w znacznym stopniu utrudnione, a niekiedy nawet niemożliwe. Na podstawie analizy doniesień literaturowych można stwierdzić, że naprawa ewentualnych błędów popełnionych w końcowych fazach projektowania może być bardzo trudna. Koszty takich operacji są niejednokrotnie zbliżone do kosztów wykonania gotowego obiektu.

Pojęcie elementu konstrukcyjnego jest nierozerwalnie związane z karbem konstrukcvinvch. powstałvm ze wzgledów funkcionalnvch czv technologicznych. Takim karbem są również występujące spoiny wraz ze strefami przyległymi. Obecnie trudno sobie wyobrazić współczesne budownictwo okrętowe czy kolejowe bez łączenia materiałów metodą spawania. 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. Skutkiem tego w obszarach występowania spoin inicjowane są pęknięcia zmęczeniowe. Skomplikowało to istotnie metody obliczeń spawanych elementów konstrukcyjnych poddanych obciążeniom zmiennym.

Wraz z rozwojem nowych technologii spawania (spawanie laserowe, zgrzewanie tarciowe czy wybuchowe) poszerzeniu uległ obszar niewiedzy związany z zagadnieniem rozkładu lokalnych właściwości zmęczeniowych w połączeniach spajanych. Uzyskane w wyniku zastosowania nowych technologii spajania połączenia spawane nie zawsze można skutecznie opisywać i obliczać metodami opracowanymi dla klasycznych połączeń.

Problem inicjacji pęknięć zmęczeniowych w obszarach połączeń spawanych znany jest od lat. Uległ znacznemu nasileniu od czasu budowy przestrzennych konstrukcji spawanych o znacznych gabarytach poddawanych obciążeniom zmiennym (maszyny robocze, pojazdy szynowe, tankowce, platformy wiertnicze, masowce itp.) [1,2,9,10]. Powstawaniu pęknięć zmęczeniowych przeciwdziałano na początku przyjmując duże współczynniki bezpieczeństwa, co doprowadzało do obniżenia naprężeń nominalnych, zaniedbując jednocześnie lokalne stany spiętrzenia naprężeń. W ogólności była to metoda nieskuteczna. Duża przeszkodą zastosowaniu metod obliczeniowych na zmeczenie elementów w konstrukcyjnych jest brak danych literaturowych dotyczących właściwości zmęczeniowych różnego rodzaju złączy spawanych. Dostępne dane dotyczą z reguły nieskomplikowanych konstrukcji spawanych poddanych obciążeniom jednoosiowym, niejednokrotnie bardzo mocno różniących się od węzłów spawanych stosowanych w rzeczywistych konstrukcjach.

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 ma miejsce wprowadzenie zmian i powtarzanie w sposób iteracyjny kolejnych etapów 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 drogich 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.

1.1.1. 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.

1.1.2. 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.

1.1.3. 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 strukturze,
- badania elementarnych węzłów i zespołów,
- badania końcowe złożonej struktury.

2. ZMĘCZENIE KONSTRUKCJI SPAWANYCH

2.1. GENEZA PĘKNIĘĆ ZMĘCZENIOWYCH

Konstrukcje spawane w czasie eksploatacji mogą być poddawane obciążeniom zmiennym. Zmianie może podlegać wiele parametrów obciążenia, z których najważniejsze to kierunek obciążenia, jego charakter, prędkość, częstotliwość, wartość średnia itp. W trakcie eksploatacji zmienne wartości naprężeń mogą powodować powstawanie pęknięć zmęczeniowych. Powstające pęknięcie z każdym kolejnym cyklem obciążenia powoduje zmniejszenie pola przekroju poprzecznego zwiększając w ten sposób wartość naprężeń. Końcowym etapem jest osiągnięcie wartości naprężeń dorównujących doraźnej wytrzymałości na rozciąganie R_m dla danego materiału lub przekroczenie wartości odporności na pękanie K_{Ic}.

W konstrukcjach spawanych do powstania pęknięcia zmęczeniowego dochodzi w miejscach gwałtownej zmiany geometrii, pola przekroju obciążanego elementu lub zmian strukturalnych. Takim miejscem jest obszar spoiny (SWC, lico spoiny, grań spoiny). Dodatkowo w obszarach spoin mogą występować liczne wady spawalnicze [11]. Z tego względu sama spoina i jej otoczenie są kluczowe z punktu widzenia trwałości zmęczeniowej elementu konstrukcyjnego. Powyższe potwierdzają liczne katastrofy obiektów spawanych podczas projektowania, w których zaniedbano zjawiska zmęczenia. Na Rys. 2 pokazano przykład pęknięcia zmęczeniowego statku. Skutkiem takich zdarzeń są bardzo duże straty materialne. Nierzadko prowadzą one również do katastrof ekologicznych [12].



Rys. 2. Katastrofa statku typu Liberty

Na podstawie analizy obiektów technicznych takich jak statki morskie można stwierdzić, że eksploatowane są już z pęknięciami [13]. Przeprowadzona analiza pęknięć zmęczeniowych w 52 drobnicowcach wykazała bardzo dużo pęknięć o zróżnicowanej długości (Rys. 3).



Rys. 3. Pęknięcia zmęczeniowe dłuższe od 200 mm po kontroli 52 drobnicowców [9]

Pęknięcia te są inicjowane w różnych obszarach statku i różna jest ich intensywność występowania. Najczęściej zlokalizowane są w obszarach węzłów spawanych, których ze względu strukturę statku (struktura powłokowa) jest bardzo dużo. Najważniejszą sprawą dla użytkownika jest monitoring propagujących pęknięć zmęczeniowych.

Przełom zmęczeniowy charakteryzuje się specyficznym wyglądem. Można wydzielić na jego powierzchni kilka stref [4]. Większość pęknięć zmęczeniowych jest inicjowana na powierzchni zewnętrznej obiektu. Nie jest to jednak regułą. Szczególnie niebezpieczne są przełomy zmęczeniowe posiadające ognisko zmęczenia usytuowane pod powierzchnią.

W konstrukcjach spawanych ogniskami mogą być zarówno same spoiny, jak również wady spawalnicze usytuowane we wnętrzu spoiny. Dla zilustrowania na Rys. 4 przedstawiono postać uszkodzenia zmęczeniowego oraz przełomu zmęczeniowego cięgła rurowego z widocznymi strefami rozwoju pęknięcia zmęczeniowego [14]. Połączenie wykonane spoiną czołową zostało poddane obróbce mechanicznej polegającej na usunięciu lica spoiny. Pomimo obróbki mechanicznej lica i likwidacji karbu geometrycznego pęknięcie zostało zainicjowane w obszarze niedostępnej grani spoiny.

Proces spawania prowadzi do istotnych zmian strukturalnych w SWC, co bezpośrednio powoduje obniżenie trwałości zmęczeniowej w stosunku do trwałości materiału jednoimiennego. Jednakże większy wpływ na obniżenie trwałości zmęczeniowej ma karb geometryczny jaki wprowadza ta metoda. Karb ten powstaje na przejściu lica spoiny w materiał rodzimy. W obszarze tym inicjowane jest pęknięcie, które rozwija się w SWC (Rys. 5a). Są to zazwyczaj mikroszczeliny powstałe na skutek niepełnego przetopu – "nieprzyklejenia" się spoiny. Przeważająca ilość pęknięć rozpoczyna się w materiale spoiny, a następnie propaguje do SWC. Do inicjacji pęknięcia zmęczeniowego może dojść również w samej spoinie (Rys. 5b). O trwałości zmęczeniowej decyduje w tym przypadku jakość spoiny, brak przetopu, przygotowanie materiałów

do spawania. Najczęściej miejscem tym jest wada spoiny. Pęknięcie może również zostać zainicjowane pomimo braku karbu geometrycznego. Na Rys. 5c pokazano przykład pęknięcia zainicjowanego w strefie wpływów cieplnych SWC.



Rys. 4. Postać pęknięcia zmęczeniowego: a) widok pęknięcia, b) przełom zmęczeniowy



Rys. 5. Przykłady pęknięć zmęczeniowych: a) na brzegu lica, b) w spoinie, c) w SWC

Powszechną przyczyną zarodkowania pęknięcia są defekty spoin wynikające z błędów w procesie spawania (Rys. 6). Nieciągłości te są niebezpieczne, ponieważ wszystkie one mogą być potencjalnymi miejscami rozpoczęcia pęknięć [15].

Należy podkreślić, że wpływ różnych czynników obniżających trwałość zmęczeniową połączeń spawanych jest bardziej widoczny w przypadku stali stopowych charakteryzujących się podwyższoną wytrzymałością w stosunku do stali konstrukcyjnych.

Na trwałość zmęczeniową wpływ może mieć zastosowana technologia spawania. Jest to zależne przede wszystkim od kształtu lica spoiny, kąta opartego wierzchołkiem o podstawę spoiny a mierzonego od lica spoiny do lica blachy, wielkości karbu pomiędzy SWC a spoiną oraz zmian struktury materiału. Na Rys. 7 pokazano w sposób schematyczny podstawowe obszary dwóch odmiennych typów spoin.

Przykładowo trwałość zmęczeniowa złączy wykonanych łukiem krytym jest niższa od takich samych złączy wykonanych metodą elektrody otulonej (MMA). Dzieje się tak z powodu różnic w wielkości kąta utworzonego pomiędzy licem spoiny a blachą dla tych dwóch metod. W metodzie spawania łukiem krytym lico spoiny jest wyższe w stosunku do lica spoiny wykonanej w oparciu o metodę elektrody otulonej. Stąd też kąt dla metody MMA ma większą wartość i nie tworzy tak dużego spiętrzenia naprężeń jak w metodzie spawania łukiem krytym.

Kształt lica jest ściśle uzależniony od technologii, jak i parametrów spawania. Jeżeli dla metody spawania łukiem krytym zostaje zastosowana mieszanka gazów osłonowych Ar + CO₂, to uzyska się zmniejszenie profilu lica spoiny i powiększenie wartości kąta pomiędzy licem spoiny a blachą łączoną, co bezpośrednio przekłada się na zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej [16].



Rys. 6. Błędy geometryczne w spoinie na przykładzie: a) spoiny pachwinowej, b) spoiny czołowej



Rys. 7. Strefy dla spoiny: a) fuzyjnej, b) bezfuzyjnej

Ściegi spoin wykonanych w pozycjach nie sprzyjających prowadzeniu spoiny mają geometrię drastycznie zmniejszającą wartość kąta pomiędzy licem spoiny a blachą łączoną. W większej mierze jest to niezależne od konkretnej technologii spajania. Na położenie pęknięcia wpływ ma również kierunek obciążenia w stosunku do spoiny. W spoinach obciążonych poprzecznie do jej długości inicjacja pęknięcia ma najczęściej miejsce na brzegu (brzegu lica), a w spoinach obciążanych wzdłuż swej długości inicjacja ma miejsce na grani. Dla naprężeń zmiennych o kierunku zgodnym do długości spoiny większą wartość trwałości zmęczeniowej uzyskuje się dla spoin spawanych łukiem krytym. Jest to spowodowane znacznie gładszą powierzchnią lica w stosunku do lic uzyskiwanych innymi metodami.

2.2. NAPRĘŻENIA SPAWALNICZE

2.2.1. Wprowadzenie

Naprężenia spawalnicze powstają w prawie każdym procesie spawania. Są nieodłącznie związane z przemianami fazowymi zachodzącymi podczas nich. Naprężenia w obiekcie technicznym mogą powstać również podczas innych procesów technologicznych takich jak odlewanie, obróbka cieplna, mechaniczna itp. 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 Rys. 8 pokazano możliwe przykłady połączeń teowych przed i po procesie spawania.



Rys. 8. Przykłady deformacji połączeń spawanych: a) przed spawaniem, b, c) po spawaniu

Poza zmianami cech geometrycznych skutki spawania przedstawione na Rys. 8 nie stanowią problemu, gdy łączone elementy nie są utwierdzone i mają możliwość swobodnego przemieszczania po spawaniu. W przypadku złożonych konstrukcji spawanych możliwość przemieszczania łączonych elementów jest najczęściej ograniczona innymi węzłami konstrukcyjnymi, co powoduje powstanie w obszarze spoiny naprężeń spawalniczych.

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 Rys. 9 pokazano w sposób schematyczny przykłady możliwego położenia zmian naprężenia eksploatacyjnego i spawalniczego σ_s .

Występujące sumowanie naprężeń powoduje zmianę naprężeń średnich σ_m i maksymalnych σ_{max} , a w konsekwencji poziomu współczynnika asymetrii cyklu obciążenia *R* i zakresu zmian współczynnika intensywności naprężeń ΔK .



Rys. 9. Położenie naprężeń eksploatacyjnych $\Delta \sigma$ w stosunku do naprężeń spawalniczych σ_s

Najbardziej niekorzystnym wariantem spośród przedstawionych jest przypadek pokazany na Rys. 9c. W wariancie 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 [4].

2.2.2. Powstawanie naprężeń spawalniczych

Naprężenia spawalnicze to jeden z rodzajów naprężeń szczątkowych powstałych podczas określonego procesu technologicznego. Występują w strukturze spawanej, pomimo że wszystkie zewnętrzne obciążenia i ograniczenia zostają usunięte. Różne terminy techniczne są używane w odniesieniu do naprężenia szczątkowego: naprężenie wewnętrzne, naprężenie początkowe, naprężenie nieodłączne, naprężenie reakcji i naprężenie uwięzione [17]. Naprężenia szczątkowe w elementach metalicznych mogą wystąpić z wielu powodów, takich jak walcowanie, odlewanie i kucie płyt i prętów, kształtowanie części metalowych za pomocą cięcia, gięcia, obróbki skrawaniem, szlifowania i spawania.

Naprężenia spawalnicze powstają w konstrukcji w wyniku miejscowych odkształceń plastycznych wprowadzonych przez zmiany temperatury lokalnej, składające się z szybkiego nagrzewania i następującego po nim etapu chłodzenia. Podczas procesu spawania obszar spoiny jest nagrzewany bardzo intensywnie w porównaniu do temperatury otoczenia i topiony lokalnie. Materiał rozszerza się w wyniku ogrzania. Rozprzestrzenianie się ciepła jest ograniczane przez otoczenie pochłaniające energię cieplną z dużą prędkością, co powoduje wzrost naprężeń cieplnych. Naprężenia spawalnicze mogą w wielu przypadkach przekraczać granicę plastyczności, która dodatkowo w podwyższonych temperaturach ulega obniżeniu. W konsekwencji obszar spawania jest plastycznie odkształcony na gorąco. Po schłodzeniu zbyt krótkiego, wąskiego lub zbyt małego obszaru spoiny w porównaniu do otaczającego materiału, rozwija się naprężenie szczątkowe, podczas gdy otaczające spoinę obszary poddawane są ściskającym naprężeniom. Dzieje się tak z powodu utrzymania równowagi naprężeniowej [18]. Na Rys. 10 przedstawiono obliczone naprężenia resztkowe i poprzeczne w środkowych przekrojach blachy ze spoiną środkowosymetryczną.



Rys. 10. Spiętrzenie naprężeń w płycie płaskiej wywołane spoiną doczołową [19]

Ze względu na cykle ogrzewania i chłodzenia oraz ograniczenia związane z otaczającym materiałem w środkowym odcinku płyty rozwija się znaczne naprężenie wzdłużnie zgodne z kierunkiem spoiny. Wraz ze wzrostem odległości od środka spoiny naprężenie wzdłużne stopniowo maleje. Wzdłuż kierunku poprzecznego naprężenie wzdłużne zmienia się na ściskające, podczas gdy wzdłuż kierunku wzdłużnego zmniejsza się do zera. Podobnie jest z poprzecznym naprężeniem szczątkowym z niewielkimi różnicami w rozkładzie od naprężenia podłużnego. Rozkład naprężeń szczątkowych w spawanych ramach jest bardziej złożony. Dla zilustrowania tego rozkładu na Rys. 11a pokazano możliwe rozszerzanie się i kurczenie spawanej rury.



Rys. 11. Deformacje na przykładzie złącza spawanego rury walcowej:
a) schemat odkształceń rury, b) rozkład sił w złączu
(Q – siła tnąca, M – moment gnący, F – siła obwodowa) [20]

W takim przypadku skurcz spoiny w kierunku obwodowym indukuje siłę obwodową F, siłę ścinającą Q i momenty zginające M względem rury. Siły te są wypadkową naprężeń spawalniczych zarówno w kierunku obwodowym, jak i osiowym. Zatem stan naprężenia w rurze spawanej obwodowo może być całkiem inny niż w płaskiej płycie.

Naprężenia spawalnicze mogą wpływać na mechaniczne zachowanie się struktur, w tym ich pękanie: korozyjne, naprężeniowe, zmęczenie i wyboczenie [21]. Naprężenia spawalnicze pochodzące od rozciągania są szkodliwe dla inicjacji i wzrostu pęknięć zmęczeniowych. Naprężenie spawalnicze wzmacniają problemu zmęczenia. W obszarze samej spoiny możliwość inicjacji pęknięć zmęczeniowych jest zdecydowanie wyższa w stosunku do obszaru materiału niezawierającego spoin.

Sam mechanizm pękania zmęczeniowego w obecności naprężenia spawalniczego nie jest jeszcze dobrze poznany. Istnieje szereg metod badań i analiz naprężeń spawalniczych.

2.2.3. Metody określania naprężeń spawalniczych

Ze względu na wpływ spawania na inicjowanie pęknięć zmęczeniowych w obszarach spoin struktur wielkogabarytowych skuteczne określenie naprężeń spawalniczych należy do podstawowych problemów badawczych.

a) Metody eksperymentalne

Obecnie istnieje wiele eksperymentalnych metod oceny rozkładu naprężeń spawalniczych. Wśród nich można wyróżnić: metody nieniszczące, takie jak dyfrakcja promieniami X, metody dyfrakcji ultradźwiękowej i neutronowej oraz metody niszczące, taka jak np. metoda wierconego otworu [19]. Spośród nieniszczących metoda dyfrakcji neutronów jest jedyną metodą, która pozwala określić naprężenia szczątkowe w spoinach ze względu na zdolność do głębokiej penetracji neutronów [22]. Kompleksowy przegląd badań eksperymentalnych można znaleźć w [17].

W literaturze można znaleźć liczne opisy prac podejmowanych w celu eksperymentalnego pomiaru wielkości i rozkładu naprężeń szczątkowych w połączeniach rurowych ze stali nierdzewnej. W pracy [23] zmierzono naprężenia spawalnicze w przekroju blachy o grubości do 33 mm. Dane te były podstawą opracowania zalecanego profilu naprężeń szczątkowych ASTM XI dla spoin doczołowych w austenitycznych rurach ze stali nierdzewnej o grubości ścianki większej niż 25 mm. W pracy [24] przeprowadzono badania w celu monitorowania i dokumentowania grubości spoiny i jej skurczu dla różnych geometrii, parametrów i sekwencji spawania. Wykazano, że optymalizując parametry spawania, geometrię i sekwencje można zminimalizować stan naprężeń spawalniczych na wewnętrznej powierzchni spawanych rur.

W 1986 r. w pracy [20] przedstawiono wyniki pomiarów rozkładu temperatury w kierunku grubości ścianki podczas spawania stali nierdzewnej. Stwierdzono, że różnica temperatur między wewnętrzną i zewnętrzną powierzchnią spawanego materiału podczas spawania decyduje o ostatecznym stanie naprężeń szczątkowych na wewnętrznej powierzchni. Jonsson i jego współpracownicy oraz Josefson i Karlsson badali spoiny jedno- i wielościegowe w złączach ze stali miękkiej. Naprężenie przejściowe mierzono w różnych pozycjach podczas samego spawania, a naprężenie szczątkowe mierzono po zakończeniu spawania. Odnotowano odchylenia od osi symetrycznego odkształcenia i pola naprężeń powstałego podczas spawania [25]. Również eksperymentalnie przebadano rozkład przestrzennych naprężeń spawalniczych w spoinach doczołowych rur metoda dyfrakcji neutronów. W przypadku tego złącza stwierdzono, że największe naprężenie rozciągające zaobserwowano w kierunku obwodowym u nasady spoiny, natomiast naprężenie ściskające obserwowano w pobliżu powierzchni strefy spawania. W przypadku spawanej stali weglowej zaobserwowano, że naprężenia wzdłużne w strefie przetopu i wpływu ciepła zmieniały się o 200 MPa w zależności od grubości, podczas gdy osiowe naprężenie szczątkowe zmieniały się 40 MPa na powierzchni dolnej i -100 MPa na powierzchni górnej. Porównano także wyniki pomiarów metodą dyfrakcji neutronowej z wynikami uzyskanymi metodą dyfrakcji rentgenowskiej i metody tensometrycznej i wykazano dobrą zgodność między nimi. W roku 2001 Murugan [26] dokonał pomiaru naprężeń szczątkowych dla cykli termicznych związanych z każdym ściegiem spoiny łaczącej stal

nierdzewną AISI typu 304 i stali niskowęglową. W pracy omówiono zmiany szczytowego naprężenia rozciągającego z osadzaniem się zgrubień spoiny oraz zależność między temperaturami szczytowymi a naprężeniami szczątkowymi w podkładkach spawanych. Okazało się, że wraz ze wzrostem liczby przejść szczytowe naprężenie szczątkowe rozciągające stopniowo zmniejsza się po stronie grani i stopniowo wzrasta po stronie lica. Stwierdzono również, że w strefie o niższej temperaturze (400-700 °C) naprężenie wzrasta gwałtownie, podczas gdy w temperaturach powyżej tego obszaru wzrost naprężeń szczątkowych jest stopniowy.

b) Metody numeryczne

Eksperymentalna analiza procesu spawania z punktu widzenia powstających naprężeń spawalniczych jest podstawowym narzędziem w ocenie stanu naprężeń. Posiada jednak wady. Najważniejsze to, że w wielu przypadkach okazuje się być zbyt kosztowna i czasochłonna. Często również nie zapewnia pełnego obrazu temperatury i odkształcenia w samych spoinach. Z drugiej strony szczegółowe pomiary eksperymentalne rozkładów odkształceń sprężystych w spawanych elementach są zazwyczaj niemożliwe do wykonania z punktu widzenia produkcji przemysłowej.

Bardziei efektywnym sposobem oceny naprężeń spawalniczvch w porównaniu do metod eksperymentalnych są metody numeryczne. Jednak opracowanie schematu modelowania numerycznego wymaga solidnych podstaw eksperymentalnych. Analiza doniesień literaturowych pozwala stwierdzić, że istnieje wiele prac, w których opisano wyznaczanie naprężeń metodami analitycznymi i numerycznych [16,27,28]. Prace te pozwoliły lepiej poznać i zrozumieć rozkłady naprężeń wywołane procesami spawania. Rodzaj zastosowanego modelu i stopień zaawansowania analizy często zależały dokładności i zasobów obliczeniowych dostępnych wvmaganei od do rozwiązania problemu. Podczas opisu naprężeń spawalniczych autorzy stosowali różne stopnie uproszczenia. Dotyczyły one wyrażeń analitycznych opisujacych skurcz i deformacje struktury oraz pola napreżeń szczatkowych dla prostych geometrycznie konstrukcji spawanych. W pracy [29] Leggatt i White zaproponowali zależności teoretyczne do opisu wzdłużnego i poprzecznego skurczu oraz deformacji kątowych dla płyt spawanych doczołowo.

W uproszczonych metodach analitycznych [20] zakłada się, że naprężenia powstające podczas spawania są skutkiem miejscowych odkształceń plastycznych generowanych podczas chłodzenia po spawaniu. Pomimo że spawanie podlega wielu złożonym zmianom fizycznym obejmującym interakcje między zmianami mikrostrukturalnymi, zmianami cieplnymi i zmianami mechanicznymi, to podczas procesów spawania głównie odkształcenia plastyczne determinują charakter i wielkość odkształceń szczątkowych. Oznacza to również, że można pominąć temperaturę i historię naprężeń występujących we wczesnych etapach spawania. Ta uproszczona metoda jest często określana jako metoda nieodłącznego odkształcania [20]. W tej samej pracy autor zaproponował metodę nieodłącznego odkształcania, która wykorzystuje połączone eksperymentalne i analityczne podejście do określenia źródła naprężenia szczątkowego poprzez wykorzystanie charakterystyk rozkładu nieodłącznych odkształceń indukowanych w długim złączu spawanym. Nieodłączny model odkształcenia przyjmuje stan osiowo-symetryczny. Skutkiem tego nie pozwala przewidywać przejściowych rozkładów naprężeń w pobliżu miejsca rozpoczęcia i zatrzymania spoiny [30].

Wraz z rozwojem metody elementów skończonych (MES) do analizy procesu spawania podejścia analityczne zostały wyparte poprzez metody numeryczne. Zaleta metody elementów skończonych jest to, że w wyniku daje ona rozkład stanu naprężeń szczątkowych. Ponadto model analityczny użyty w metodzie numerycznej może być dalej rozwijany tak, aby symulować występowanie pełzania, ścinania, zginania występujących podczas obciążenia eksploatacyjnego. Dzięki zastosowaniu MES można uwzględnić efekty nieliniowe, takie jak konwekcja zależna od temperatury, przepływ materiału i zwiększenie objętości podczas ewentualnej końcowej przemiany fazowej. W ten sposób można dokładnie prześledzić historię zmian temperatury w konstrukcji podczas spawania i następującego po nim chłodzenia oraz odpowiednie kumulowanie się naprężeń. Już w latach 80 ubiegłego wieku F. Rybicki przedstawił model naprężenia szczątkowego w spawanych rurach za pomocą termo-elastyczno-plastycznego modelu elementów skończonych w oparciu o funkcję temperatury ruchomego źródła ciepła [31]. Wyniki obliczeń uzyskane z wykorzystaniem tego modelu cechuje wysoka zgodność z wynikami badań eksperymentalnych. Ograniczeniem tego modelu jest zastosowanie przybliżonych rozwiązań analitycznych do odwzorowania historii zmian temperaturowych, które zakładaja stałe właściwości termofizyczne i warunki brzegowe oraz ignorują wpływ utajonego ciepła topnienia.

W pracy [32] W. Brust i B. Sonesifer badali wpływ parametrów spawania na naprężenia spawalnicze w systemach rurowych reaktora wody wrzącej. Podczas obliczeń zastosowali model zaproponowany w pracy przez Rybickiego w pracy [31]. Analiza uzyskanych wyników pozwoliła stwierdzić, że obniżenie dostarczanego ciepła powoduje obniżenie rozciągającego osiowo naprężenia szczątkowego w strefie wpływu ciepła (SWC). Stwierdzili również, że zmiana dostarczonego ciepła do spoiny wpływa bardziej na stan naprężeń w rurach o mniejszych średnicach niż w rurach o średnicach większych.

B. Brickstad i B. Josefson [33] przeprowadzili szereg analiz spawanych struktur ze stali nierdzewnej z wykorzystaniem programu ABAQUS. W szczególności badano zmiany grubości strefy spawania i strefy wpływu ciepła. Analizie poddano naprężenia osiowe oraz ich wrażliwość na zmiany parametrów spawania. Porównanie zmian grubości oraz naprężenia osiowego uwidoczniło dobrą zgodność wyników obliczeń i badań dla elementów cienkościennych (g < 25 mm). Opracowana przez nich metodyka znalazła szerokie zastosowanie w konstrukcji spawanych obiektów, szczególnie rurociągów. Większość badań naprężeń szczątkowych przeprowadzono w oparciu o założenia osiowosymetryczne lub 2D. Postępowano tak zazwyczaj ze względu na ograniczenia kodów elementów skończonych i zasobów komputerowych dostępnych w czasie obliczeń. Ponadto zakładano, że problemy termomechaniczne zostały odseparowane, gdyż odpowiedzi termiczne i mechaniczne były traktowane oddzielnie [34]. W analizie 3D założenie osiowosymetryczne zostało zastosowane głównie dlatego, że koszt związany z analizą trójwymiarową był czynnikiem, który dyskwalifikował takie podejście. Chociaż niektóre z podstawowych charakterystyk naprężeń szczątkowych można racjonalnie ująć za pomocą założenia symetrii obrotowej, jednakże nie pozwala to na poprawne odzwierciedlenie pól odkształceń i naprężeń. Aby symulować reakcję zmęczeniową połączeń spawanych w obecności naprężeń szczątkowych konieczne jest przeprowadzenie analiz trójwymiarowych.

Rozwój metod numerycznych pozwala na coraz bardziej szczegółowe analizy naprężeń spawalniczych. Przeprowadzone analizy metodą elementów skończonych złączy spawanych w jeziorku spawalniczym pozwoliły na analizę powstałych rozkładów naprężeń spawalniczych dla zróżnicowanych połączeń. Stwierdzono duże naprężenia ściskające i rozciągające w grani i licu spoiny dla badanych sekwencji spawania [35].

2.2.4. Wpływ naprężeń spawalniczych na pękanie zmęczeniowe

W analizach zmęczeniowych konstrukcji spawanych wykorzystuje się najczęściej wyniki badań próbek materiałowych w postaci wykresów w układzie współrzędnych S-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 występujacych w połaczeniach 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 adaptacji prostych wykresów zmęczeniowych uzyskanych możliwość z wykorzystaniem prostych próbek materiałowych. Dzieje się tak głównie dlatego, że interakcje między różnymi naprężeniami spawalniczymi obciażeniami moga skutkować różnymi reakcjami przyłożonymi а na odkształcenia i trwałość zmeczeniowa w porównaniu z badaniami próbek realizowanymi dla opracowania wykresu zmęczeniowego. Ponadto zwykle przyjmuje się, że naprężenia ściskające mają korzystny wpływ na rozwój uszkodzenia zmęczeniowego. W pracy [36] wykazano jednak, że nawet jeden cykl naprężenia ściskającego może być tak samo szkodliwy, jak cykl naprężeń rozciągających gdy wystąpi wraz z odpowiednim naprężeniem rozciągającym bedacego skutkiem procesu spawania (napreżenia spawalniczego).

Po drugiej wojnie światowej rozpoczęto serię pionierskich badań dotyczących opracowywania metod projektowania zmęczeniowego

dla spawanych elementów. Seria próbek badanych w warunkach kontrolowanego przemieszczenia została przeprowadzona na próbkach spawanych czołowo [37]. W badanych złączach spawanych występowały naprężenia spawalnicze, które nie reprezentowały szerokiego zakresu naprężeń występujących w złączach podczas eksploatacji. W pracy wykazano, że naprężenie spawalnicze pochodzące od rozciągania może osiągać wartości zbliżone a nawet przekraczające granicę plastyczności.

M. Higuchi [38] realizował badania zmęczeniowe próbek spawanych o małych wymiarach w warunkach czteropunktowego zginania obrotowego. W pracy analizowano wpływ różnych parametrów takich jak rodzaj stali, wymiary spoiny, jej grubość, kształt lica, odstęp pomiędzy łączonymi elementami i wady grani na trwałość zmęczeniową. Na Rys. 12 pokazano schematycznie analizowane połączenie.



Rys. 12. Różne rozwiązania technologiczne tego samego złącza spawanego gniazdowego: a) ostatni ścieg przy stopie spoiny, b) luz w złączu G = 0

Na podstawie badań stwierdzono, że trwałość zmęczeniowa jest większa dla próbek o mniejszych wymiarach z końcowym przejściem u stopy spoiny (Rys. 12a) i bez szczeliny, którą należy wypełnić (Rys. 12b). Podczas badań wykazano również, że pęknięcia powstały zwykle u podstawy spoiny, gdy amplituda naprężeń była duża przy niższej trwałości zmęczeniowej oraz u szczytu spoiny, gdy amplituda była niewielka przy większej trwałości. Wpływ naprężeń spawalniczych został oceniony przez porównanie trwałości zmęczeniowej próbek w stanie po spawaniu z próbkami spawanymi poddanymi obróbce cieplnej poprzez wysokie odpuszczanie. Stosując zmodyfikowaną metodę Goodmana uzyskano wykresy zmęczeniowe *S-N* odpowiadające maksymalnym naprężeniom rozciągającym i ściskającym. Analiza uzyskanych wyników pozwala stwierdzić, że trwałość zmęczeniowa połączeń spawanych w złączu jest silnie uzależniona od sekwencji kolejnych ściegów spoiny, a tym samym od powstałych naprężeń spawalniczych.

Znacząco wysoką poprawę trwałości poprzez zredukowanie gradientu odkształceń spawalniczych zaproponował P. Riccardella. Na podstawie badań realizowanych na małych złączach wykazał, że zwiększenie wysokości spoiny przy jednoczesnym pozbawieniu jej pola przekroju kształtu symetrycznego trójkąta powoduje znaczącą redukcją gwałtownego przyrostu naprężeń spawalniczych, wzrost trwałości porównywalny do trwałości dla dwukrotnie większego wymiaru wymaganego obecnie w normach ASME (Rozdział III, Edycja 1998), jak pokazano na rysunku Rys. 13 [39]. Taka konfiguracja geometrii spoiny ma wpływ na wartość współczynnika redukcji naprężenia o wysokim cyklu

w stosunku do standardowej wartości opisanej dla danego typu złączy spawanych.



Rys. 13. Rozmiar złącza gniazdowego: a) wg ASME, b) zmodyfikowana geometria

Na poziom naprężenia spawalniczego, a tym samym na trwałość zmęczeniową połączenia spawanego wpływ ma odpowiednia sekwencja kolejnych przejść. W pracy [40] poddano analizie porównawczej wyniki pomiarów naprężeń spawalniczych oraz uzyskane trwałości badań eksperymentalnych i numerycznych połączeń o różnych sekwencjach kolejnych ściegów. Analizę prowadzono z wykorzystaniem połączeń wykonanych spoiną pachwinową (Rys. 14). Badania wykazały, że poprzeczne naprężenie spawalnicze u stopy spoiny uległo wyraźnemu obniżeniu (do 80 MPa), gdy ostatnie przejście spawalnicze znajdowało się po stronie płyty głównej. W próbce, w której ostatnie przejście było po stronie żebra osiągnięto naprężenia przy brzegu lica równe 170 MPa. Ponadto trwałość zmęczeniowa próbki z ostatnim przejściem spoiny na płycie głównej (Rys. 14a) była istotnie wyższa od trwałości połączenia, w którym ostatnie przejście było po strony wspornika (Rys. 14.b).



Rys. 14. Porównanie poziomu naprężeń pospawalniczych: a) z ostatnim przejściem na płycie głównej, b) z ostatnim przejściem na wsporniku

2.2.5. Redukcja naprężeń spawalniczych

Jednym z podstawowych działań zmierzających do poprawy trwałości zmęczeniowej jest obniżanie naprężeń spawalniczych. W celu zmniejszenia naprężeń spawalniczych już na etapie projektowania ustala się odpowiednią technologię spawania z podaniem kolejności wykonywania poszczególnych spoin i kolejność ściegów w spoinie. Zabiegi te nie pozwalają jednak całkowicie zapobiec powstaniu naprężeń spawalniczych. Z tego względu po operacji spawania przeprowadza się różne zabiegi obniżające te naprężenia. 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 zgorzeliny w przypadku, gdy nie wyżarza się w atmosferze ochronnej lub w próżni i związana z tym konieczność dodatkowej obróbki polegającej na usuwaniu zgorzeliny,
- odpuszczenie stali ulepszanych z niską temperaturą odpuszczania,
- kruchość stali i pękanie stali wraz ze zmianą własności mechanicznych, które powodują powstawanie braków w wyniku pękania konstrukcji.

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

Najstarszym i powszechnie znanym zabiegiem z tej grupy jest starzenie naturalne (sezonowanie konstrukcji spawanych). Polega ono na umieszczeniu elementu (konstrukcji spawanej, odlewu, odkuwki) na odkrytej przestrzeni i poddaniu go działaniu czasu i zmiennych warunków pogodowych (głównie wahań temperatury). Procesy samoczynnej relaksacji naprężeń resztkowych przebiegają nieliniowo - szybciej na początku - i trwają nawet kilka lat.

Często stosowaną metodą likwidacji naprężeń spawalniczych i stabilizacji wymiarów jest odkształcenie plastyczne na zimno. Obserwacja zjawiska stabilizacji elementów metalowych w wyniku poddania ich odkształceniom na zimno doprowadziła w latach 40-tych do opracowania metody odpreżania wibracyjnego [41–43]. Metoda polega na przyspieszonym sezonowaniu elementów maszyn i konstrukcji przez poddanie ich drganiom - głównie rezonansowym. Dzięki wymuszaniu różnych postaci drgań rezonansowych w całej objętości odprężanego elementu zachodzi istotne zmniejszenie szczytowych naprężeń do poziomu, przy którym nie zachodzą już niekorzystne zjawiska. Metoda ewoluowała przez ostanie kilkadziesiąt lat i ze słabo znanej sztuki inżynierskiej stała się w niektórych branżach przemysłu metalowego procesem podstawowym. Jest stosowana jako alternatywa obróbki wyżarzaniem do odlewów i elementów spawanych. Zainteresowanie tą technologią wynika z jej względnej prostoty i taniości. Mechanizm relaksacji naprężeń w elementach metalowych poddanych drganiom badany i opisywany jest w literaturze od wielu lat, lecz brak jest jednoznacznej i akceptowanej przez wszystkich teorii zjawiska. Na Rys. 15 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. Najważniejsze to:

- może być stosowana na dowolnym etapie procesu technologicznego, np. tuż przed obróbką skrawaniem konstrukcji spawanej,
- umożliwia stosowanie mniejszych naddatków technologicznych (brak zgorzeliny!),
- umożliwia połączenie obróbki zgrubnej i półwykańczającej,
- czas zabiegu ograniczony jest do kilkudziesięciu minut a nie kilkudziesięciu godzin, jak to jest przy wyżarzaniu lub lat przy sezonowaniu,
- jest niezastąpiona przy stabilizacji wymiarowej elementów regenerowanych np. przez spawanie lub napawanie,



Rys. 15. Stanowisko do odprężania czołownicy pojazdy szynowego [źródło: WIBROPOL - dr inż. Marek Majewski]

- po odprężaniu nie obserwuje zmian własności mechanicznych metali,
- proces odprężania jest monitorowany i rejestrowany, a charakterystyki rezonansowe mogą służyć jako dokumenty w zakładowym systemie kontroli jakości,
- odprężane mogą być elementy o wadze od kilku kilogramów do kilkuset ton także konstrukcje rozległe jak np. pudła wagonów,
- koszt odprężania wibracyjnego jest wielokrotnie mniejszy od kosztów wyżarzania,
- możliwa jest obróbka elementów składających się z różnych metali.

Jak każda technologia odprężanie wibracyjne ma też swoje ograniczenia. Należą do nich przypadki, w których:

- element jest na tyle sztywny, że w zakresie pracy wibratora nie występują drgania własne bez których zjawisko odkształceń rezonansowych nie wystąpi,
- element zawiera naprężenia powstałe w wyniku odkształceń na zimno,
- konieczne jest podczas odprężania wystąpienie zmian strukturalnych w materiale.

Poddawanie elementów intensywnym drganiom może mieć wpływ na trwałość zmęczeniową. Obawa przed ograniczeniem tej wytrzymałości bywa przeszkodą w stosowaniu odprężania wibracyjnego. W pracach na ten temat nie ma żadnych dowodów na to, że odprężanie wibracyjne pogarsza wytrzymałość zmęczeniową.

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

Przykładem metod z tej grupy może być uwzględnianie w procesie technologicznym występujących deformacji poprzez wzajemne ustawienie łączonych elementów. Skutkiem tego po spawaniu występujące odkształcenia spawalnicze nie objawiają się w zmianie wymiarów gotowego obiektu.

2.2.6. Metody poprawy trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych

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 (FIT-ness-for-service NETwork) [44], które opracowane zostały w ramach Europejskiego Programu Badawczego Nr GIRT-CT-2001-05071. Ogólny charakter procedur sprawia, że moga one być stosowane w różnych dziedzinach przemysłu. W procedurach FITNET-u dotyczących połączeń spawanych podano różne metody podwyższania trwałości złączy spawanych. Stosując te metody można doprowadzić do istotnego podwyższenia napreżeń dopuszczalnych dla połaczeń spawanych. Same techniki zwiększania trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych podawane w procedurach FITNET są ogólnie znane. Nie jest natomiast znany wpływ zastosowanych zabiegów na właściwości zmęczeniowe modyfikowanych obiektów. Problemem badawczym, a jednocześnie kierunkiem dalszych prac być określenie wpływu różnych badawczych powinno zabiegów technologicznych na właściwości zmęczeniowe obiektów wykonywanych w technologii spawania.

W konstrukcjach obciążonych zmiennie można uzyskać wzrost trwałości zmęczeniowej przez zastosowanie takich procesów technologicznych jak przekuwanie, przeprężanie, czy śrutowanie spoiny i jej okolicy. Wielu badaczy zajmowało się różnymi technikami i zauważyło znaczną poprawę parametrów zmęczeniowych, jednakże brak standaryzacji spowodował duże zróżnicowanie wyników [45]. Dotychczas opracowano wiele metod, które zebrano w Tab. 1 wraz z odpowiednimi odniesieniami. Są one podzielone na dwie główne grupy w zależności od ich głównego efektu [46]:

- modyfikacje naprężeń pospawalniczych,
- modyfikacje karbu u podstawy spoiny.

W dzisiejszych czasach istnieje tylko jeden zbiorczy dokument zawierający wskazówki dotyczące niektórych z tych metod, a mianowicie: metody przetopu powtórnego TIG, szlifowania bruzd, igłowania, młotkowania [47]. W niniejszej pracy na szczególną uwagę zwrócono na dwie metody stosowane podczas procesu technologicznego produkcji obiektu badań przyjętego w ramach poniższej pracy omówionemu w rozdziale 3. Należą do nich: metoda przetopu powtórnego TIG i igłowanie.

W metodzie TIG wykorzystuje się nietopliwą elektrodę wolframową (tungsten). Pomiędzy elektrodą a materiałem spawanym jarzy się łuk elektryczny osłaniany gazem obojętnym (inert gas). Łuk elektryczny stapia spawany materiał tworząc spoinę. Jeśli jest taka potrzeba materiał dodatkowy podawany jest z boku, najczęściej ręcznie (podobnie jak przy spawaniu gazowym). Metoda TIG umożliwia łączenie prawie wszystkich metali i ich stopów przy zapewnieniu wysokiej jakości złączy spawanych. W przypadku przetopu powtórnego przetopieniu podlega obszar brzegu lica spoiny i elementu łączonego (Rys. 16).

Modyfikacje naprężeń pospawalniczych	Metody mechaniczne	Śrutowanie	Młoteczkowanie
			Igłowanie
			Kulowanie
			Kulowanie
			ultradźwiękowe
		Metody	Wstępne przeciążanie
		przeciążeniowe	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	Kontrolowanie kształtu lica spoiny	
	spawania	Specializowane elektrody	

Tab. 1.Podział metod poprawy właściwości zmęczeniowych obiektów
spawanych [48]



Rys. 16. Zalecane ustawienie kątów ustawienia elektrody a) w poprzek spoiny, b) wzdłuż spoiny

Ze względu na obrabiane materiały, grubości ścianek i pozycje spawania, TIG to uniwersalna w zastosowaniu metoda spawania, jak i również przetapiania wtórnego. Pozwala na uzyskanie połączeń spawanych najwyższej jakości. Za pomocą tej metody realizowany może być proces poprawy spoin łączących każdy spawalny materiał metaliczny. Jest to metoda bardzo "czysta", ponieważ niemal nie towarzyszą jej rozpryski, wytwarzana jest mała ilość szkodliwych substancii, a w przypadku prawidłowego stosowania powstają spoiny bardzo dobrej jakości. Inną zaletą spawania TIG jest to, że w przeciwieństwie do innych metod wykorzystujących elektrode topliwa stosowanie materiału dodatkowego jest niezależne od natężenia prądu. Dlatego spawacz może optymalnie dopasować prąd do zadania spawalniczego i dawać tylko taką ilość materiału dodatkowego, która jest niezbędna w danym momencie. Dzięki temu metoda ta szczególnie dobrze nadaje się do przetopu warstw graniowych lub w pozycjach wymuszonych. Wymienione zalety sprawiają, że metoda powtórnego przetopu TIG jest obecnie stosowana z powodzeniem w wielu gałęziach przemysłu podczas wykonywania prostych połaczeń, jak również złożonych i odpowiedzialnych obiektów. W przypadku spawania ręcznego wymagana jest jednak doświadczona "ręka" spawacza oraz dobre wykształcenie. Zabieg powtórnego przetopu może być stosowany zarówno w spoinach powstałych w jednym przejściu, jak również w spoinach wielkościegowych (Rys. 17).



Rys. 17. Wpływ odległości elektrody (palnika) od spoiny na geometrię lica: a) kształt optymalny, b), c) przetopienie – nadmierny wypływ

Jakość zabiegu powtórnego przetopu zależy od wielu czynników. Spoina i blacha łączona powinny być skrupulatnie oczyszczone z żużla i zgorzelin pospawalniczych. Dopuszczalne metody to szczotkowanie i szlifowanie szlifierkami recznymi przy zastosowaniu tarcz bezkorundowych. Nieodpowiednie przygotowanie powierzchni prowadzi do wytworzenia pęcherzy gazowych, które niekorzystnie wpływają na trwałość zmęczeniową. W zaleceniach technologicznych opisanych w "Improvement of the fatigue strength of welded joints" z 1971 r. wskazuje się minimalne ilości energii dostarczanej na poziomie 1.0 kJ/mm, a także podkreśla znaczenie utrzymywania końcówki elektrody w czystości i ostrości w celu uniknięcia porów [49]. Odległość pomiędzy środkiem łuku a krawędzią spoiny zależna jest od kąta nachylenia profilu spoiny, natomiast palnik powinien być skierowany bliżej spoiny o płaskich licach. Na Rys. 17 zilustrowano różne profile lic spoiny, które powodują zmianę odległości łuku palnika. Optymalny kształt pokazano na Rys. 17a. Jeżeli kształt uzyskanego przetopu nie jest zbliżony do pokazanych na rysunku Rys. 17b i c, to należy rozważyć przeprowadzenie procesu naprawczego, takiego jak np. drugi ścieg TIG.

Poprawę właściwości zmęczeniowych można osiągnąć poprzez wprowadzenie do wierzchnich warstw naprężeń ściskających. Obecność naprężeń ściskających w obszarze spoiny może w niektórych przypadkach opóźnić, a nawet zatrzymać rozwijające się pęknięcie.

Zabiegiem stosowanym do wywołania naprężeń ściskających jest śrutowanie (igłowanie). Jest to metoda rutynowo stosowana w przemyśle motoryzacyjnym, transportowym i lotniczym do poprawy trwałości zmęczeniowej obiektów. Poprawę właściwości zmęczeniowych osiąga się strzelając stalowymi kulkami z prędkością dostatecznie wysoką, aby wywołać naprężenia ściskające na powierzchni ostrzeliwanego przedmiotu. Stalowe kulki mogą zostać zastąpione stalowymi igłami (igłowanie). Proces śrutowania przedstawiono w sposób schematyczny na Rys. 18a.

Naprężenia ściskające powstają w wyniku odkształceń na zimno generowanych poprzez uderzające z dużą energią kulki stalowe (igły) [50]. Ze względu na równowagę naprężeń w materiale, naprężenia ściskające blisko powierzchni są równoważone naprężeniami rozciągającymi w niewielkiej odległości od powierzchni (Rys. 18b). Należy podkreślić, iż dla cieńszych blach wzrasta wartość naprężeń rozciągających. Parametry uzyskanej powierzchni są zależne od właściwości materiału, mikrostruktury, kształtu śrutu, prędkości i częstotliwości. Typowe średnice śrutu wynoszą około 0,2-1,0 mm, a prędkości wahają się od 40 do 60 m/s. Gdy choć jeden z tych parametrów nie doprowadzi do pożądanej wielkości plastycznego odkształcenia może dochodzić do wad mających wpływ na skuteczność zabiegu.

Z jednej strony niewłaściwie przeprowadzone śrutowanie może nie być skuteczne z powodu niewystarczającej wartości ściskających naprężeń, a z drugiej strony nadmierne śrutowanie może spowodować uszkodzenie powierzchni, takie jak mikropęknięcia, nadmierna chropowatość i poważne zmiany mikrostruktury. Istotna jest również interakcja pomiędzy kulkami i powierzchnią, np. kąt uderzenia i tarcie między powierzchniami. Kontrola wszystkich czynników mających wpływ na jakość śrutowania jest trudna do przeprowadzenia, podobnie jak w przypadku kształtu i prędkości kulki. W literaturze można znaleźć metody opisywania zmiennych intensywności śrutowania poprzez metodę "Almen" i metodę wydajności pokrycia. Pierwsza metoda polega na przedstawieniu wartości pomiaru za pomocą pasków Almen (wykonanych ze stali sprężynowej SAE 1070) umieszczonych na powierzchni i poddanych takiej samej obróbce śrutowniczej jak właściwy obiekt. Po śrutowaniu wielkość odchylenia szczątkowego mierzy się w pewnych miejscach przy użyciu miernika Almen i w ten sposób dla danego materiału i grubości określa się intensywność śrutowania. W drugiej metodzie porównuje się obszar powierzchni odkształconej z całkowitą powierzchnią śrutowaną. Przyjmuje się, że 100% pokrycia osiąga się, gdy badanie wzrokowe przy 10-krotnych powiększeniach ujawnią, że wszystkie wgłębienia występujące na powierzchni lica spoiny zachodzą na siebie [51].



Rys. 18. Śrutowanie: a) istota śrutowania, b) rozkład naprężeń w kierunku głębokości śrutowanej płyty

2.3. METODY ANALIZY TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ POŁĄCZEŃ SPAWANYCH

2.3.1. Parametry obciążenia zmiennego

Najważniejszymi parametrami wpływającym na trwałość zmęczeniową konstrukcji stalowych jest rodzaj, charakter, wartość i kierunek obciążenia cyklicznego [52]. Obciążenie zmęczeniowe powodujące zmiany lub

powtarzalność naprężeń w elementach konstrukcyjnych można określić jako różnicę w zadawanych obciążeniach. Mogą one być charakteryzowane m.in. zmianami ciśnienia, wibracją, wahaniami temperatury, obciążenia falą. Wyróżnia się dwa parametry opisujące przebieg obciążenia: R – współczynnik asymetrii cyklu opisany zależnością (1) oraz zakres zmian naprężenia $\Delta\sigma$ (Rys. 19).

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \tag{1}$$





Obciążenie zmęczeniowe można podzielić na dwa różne typy ze względu na przebieg obciążenia:

- obciążenie o zmiennej amplitudzie,
- obciążenie o stałej amplitudzie.

W czasie eksploatacji konstrukcje wielkogabarytowe są prawie zawsze poddawane obciążeniom o zmiennej amplitudzie. Jest to trudny do odwzorowania w warunkach laboratoryjnych przebieg obciążenia ze względu na brak powtarzalności. Obciążenia stałoamplitudowe są łatwe do aplikacji w badaniach laboratoryjnych, jednakże trudno jest interpretować ich wyniki na potrzeby analiz obiektów poddanym oddziaływaniu rzeczywistych obciążeń zmiennych. Obciążenia i ich zmienność w czasie w warunkach eksploatacji zwykle posiada charakter nieregularny powodujący zmienne naprężenia. Zakres zmiany naprężeń może różnić się zarówno wielkością, jak i okresem. Na Rys. 20a pokazano w sposób schematyczny przykładowy przebieg obciążenia eksploatacyjnego

Historia naprężenia to zapisane wartości kolejnych maksimów i minimów naprężeń wywołanych przez zmienne obciążenia w wybranych przekrojach. Funkcja opisująca przebieg zmian naprężeń powinna obejmować wszystkie przypadki obciążenia i odpowiadające im odpowiedzi dynamiczne. W większości przypadków przebieg naprężeń w czasie jest stacjonarny i ergodyczny. W związku z tym dane potrzebne do przeprowadzenia analizy zmęczeniowej można określić na podstawie pomiarów obciążenia eksploatacyjnego lub obserwacji przeprowadzonych w ograniczonym czasie, o ile jest to racjonalnie reprezentatywne dla obciążenia, które ma wystąpić podczas całego okresu trwałości zmęczeniowej. Historia naprężeń może być przedstawiona jako [53]:

- a) zapis kolejnych maksimów i minimów naprężeń mierzonych w porównywalnej strukturze dla porównywalnego obciążenia i trwałości lub typowej sekwencji zdarzeń obciążenia,
- b) dwuwymiarowa macierz przejścia historii naprężeń wyprowadzona z zapisu kolejnych maksimów i minimów naprężeń mierzonych w porównywalnej strukturze dla porównywalnego obciążenia i trwałości lub typowej sekwencji zdarzeń obciążenia,
- c) histogram o zakresie naprężeń jedno- lub dwuwymiarowych (wystąpienie zakresu naprężeń) otrzymany z zapisu kolejnych maksimów i minimów naprężeń mierzonych w porównywalnej strukturze dla porównywalnego obciążenia i trwałości lub typowej sekwencji zdarzeń obciążenia uzyskany określoną metodą zliczania,
- d) histogram zakresu naprężeń jednowymiarowych (przekroczenia zakresu naprężeń, widma zakresu naprężeń) określony przez przeznaczenie i rodzaj konstrukcji.

Reprezentacje (a) i (b) mogą być użyte do testowania komponentów, natomiast (c) i (d) są najbardziej przydatne do szacowania trwałości zmęczeniowej za pomocą obliczeń.

Zarejestrowany podczas eksploatacji przebieg obciążenia wymaga opracowania w celu jego wykorzystania podczas badań laboratoryjnych. Nazywane jest ono zliczaniem cykli lub schematyzacją. Proces ten polega na przekształcaniu zmiennej, losowej sekwencji naprężeń w serię cykli i półcykli stałoamplitudowych, które są równoważne pod względem uszkodzenia do pierwotnej sekwencji. Dostępne są różne metody schematyzacji, w tym zliczanie ilości przecięć zera, liczenie pików, liczenie par zakresów i liczenie metodą "Rainflow". W przypadku elementów spawanych zaleca się metodę "Rainflow" (spływających kropli deszczu) lub podobną "Reservoir" (zbiornikową) do zliczania zakresów naprężeń [54], [47]. Na Rys. 20 pokazano sposób postępowania podczas przygotowywania programów obciążenia.

Efektem schematyzacji jest widmo obciążenia. Zwykle przedstawia się widmo jako tabelę dyskretną bloków cykli o stałym zakresie naprężeń.


Rys. 20. Przygotowanie programów obciążenia: a) obciążenie eksploatacyjne, b) widmo, c) obciążenie programowane

2.3.2. Metody szacowania trwałości

a) Podejście naprężeniowe

W celu optymalizacji konstrukcji między innymi pod względem trwałości i bezpieczeństwa użytkowania opracowanych zostało wiele różnorodnych metod szacowania trwałości zmeczeniowej spawanych konstrukcji stalowych. W metodach tych do szacowania trwałości zmęczeniowej wykorzystywane są takie parametry jak odkształcenie, naprężenie badź współczynnik intensywności napreżeń. Metody szacowania trwałości zmęczeniowej złożonych konstrukcji spawanych takich jak mosty, statki czy pojazdy szynowe można podzielić na dwie zasadnicze grupy: metody globalne i lokalne [55]. Najprostszą i najbardziej popularną metodą w grupie globalnej jest metoda opierająca się na naprężeniach nominalnych. Metody lokalne to metoda "hot spot", metoda skutecznego naprężenia w karbie i metoda propagacji pęknięcia zmęczeniowego oparta na liniowo-sprężystej mechanice pękania. Wspólne dla pierwszych trzech metod jest uwzględnienie liniowej teorii sprężystości badź metod numerycznych, takich jak MES lub MEB. Oparte są one na wykresach zmęczeniowych w układzie współrzędnych naprężenie - liczba cykli (σ -N), która odnosi się do szacowania trwałości obiektu. Czwarta metoda oparta jest na zagadnieniach mających swoje źródło w mechanice pękania, która obejmuje przyrost pęknięć niezależnie od krzywej σ -N. Ze wzgledu na cel pracy nie opisano w poniższej pracy metod obliczeń podczas których analizie jest poddawany rozwój pęknięcia zmęczeniowego.

Zastosowanie metody elementów skończonych do otrzymywania informacji o naprężeniu projektowym potrzebnym do przeprowadzenia obliczeń trwałości zmęczeniowych wymaga opanowania MES w połączeniu ze zrozumieniem potrzeb metod oceny trwałości zmęczeniowej. Jest to spowodowane tym, że MES jest bardzo czuła na technikę modelowania elementów skończonych, ponieważ naprężenia często znajdują się w obszarach o wysokich gradientach odkształceń [56–58]. Rodzaje naprężeń stosowane w procesie szacowania trwałości zmęczeniowej przedstawiono na Rys. 21.



Rys. 21. Rozkład naprężeń w kierunku grubości płyty i w zależności od odległości od spoiny [59]

Do wykazania różnic w różnych metodach obliczeń wybrano dwa rodzaje węzłów ze spoiną czołową (Rys. 22). Są to popularne przykłady węzłów dla struktur wielkogabarytowych poddawanych obciążeniom zmiennym. Dane eksperymentalne przedstawione podczas opisu tego połączenia i porównania metod zebrano z przeglądu literatury [56–58].



Rys. 22. Przykłady węzłów czołowych: a) typ A, b) typ B

Podejście bazujące na naprężeniach nominalnych jest najprostszym i najczęściej stosowanym sposobem szacowania trwałości zmęczeniowej spawanych konstrukcji stalowych. Metoda ta opiera się głównie na średnim naprężeniu w badanym przekroju biorąc pod uwagę ogólne liniowo-sprężyste zachowanie obiektu. W obliczeniach naprężeń nie uwzględnia się spiętrzeń powstających na skutek oddziaływania spoin i dodatkowych płyt i cięgien. Na potrzeby projektowania trwałości zmęczeniowej spiętrzenia naprężeń wywołanych spoinami nie są w tej metodzie uwzględniane. Mimo to metodą tą analizowane są zróżnicowane konfiguracje geometryczne struktur spawanych [52,58]. Geometryczne konfiguracje i nieciągłości mogą być definiowane jako otwory, wycięcia, nieciągłości w przekroju poprzecznym lub wygięcia – krzywe, innymi słowy modyfikacje geometryczne, które często mają znaczny wpływ na rozkład naprężeń w całym przekroju poprzecznym.

Metody szacowania trwałości zmęczeniowej oparte na naprężeniach nominalnych są dostępne w większości poradników i wytycznych dotyczących projektowania, takich jak Eurocode [60]. W przypadku bardziej złożonej geometrii, dla której nie można określić nominalnego naprężenia lub kategoria poziomu Eurocode nie jest dostępna, metoda bazująca na naprężeniach nominalnych naprężeń nie jest stosowalna bezpośrednio [61]. Zamiast tego należy zastosować inną metodę szacowania trwałości zmęczeniowej.

Podczas wykorzystywania naprężeń nominalnych, gdy zbliżamy się do zmian geometrycznych na krawędziach płyt (Rys. 23), naprężenia nominalne w zmiennym przekroju porzecznym wywołanym na przykład pęknięciem mogą być przeliczone w oparciu o teorię liniowo-sprężystej belki.



Rys. 23. Naprężenie nominalne na przykładzie płyty o zmiennej geometrii

Jak wspomniano wcześniej, metoda oparta na naprężeniach nominalnych wymaga znajomości klas zmęczeniowych Eurocode bądź wykresów w układzie σ -N. Dla elementu pokazanego na Rys. 23 Eurocode 3 zaleca używanie kategorii szczegółowej C40 niezależnie od długości płyty łączącej i je wpływu na koncentrację naprężeń na jej końcu. Przykładowe wyniki testów zmęczeniowych w oparciu o naprężenia nominalne przedstawiono na Rys. 24.

Wpływ długości przyspawanych płyt na trwałość zmęczeniową można wyznaczyć w obliczeniach trwałości zmęczeniowej przy zastosowaniu naprężeń nominalnych. W przypadku długości 100 mm i krótszej zalecany wykres zmęczeniowy znajduje się w bezpiecznym obszarze trwałości zmęczeniowej.



Rys. 24. Wyniki zmęczeniowe bazujące na naprężeniach nominalnych dla płyty z połączeniem czołowym

Analiza "Hot Spot"

Podejście do analiz zmęczeniowych metoda "Hot Spot" zostało opracowane w celu oceny trwałości zmęczeniowej konstrukcji spawanych w przypadkach, gdy naprężenie nominalne jest trudne do oszacowania ze względu na złożoną strukturę oraz złożony stan obciążenia. Metoda ta od 1960 roku wykorzystana jest do projektowania zbiorników ciśnieniowych i spawanych połączeń rurowych. Została również zastosowana z powodzeniem do spawanych struktur płytowych [56,58,62,63]. Znaczenie metody "Hot Spot" do oceny trwałości zmeczeniowej spawanych konstrukcji istotnie wzrosło wraz z coraz wiekszym stosowaniem podczas analizy połączeń spawanych metody elementów skończonych. Największą zaletą tej metody jest uwzględnienie efektów wywołanych przez elementy przyłączone (przyspawane) do analizowanego obiektu. Oznacza to, że analizie można poddać złożony stan naprężeń. Należy nadmienić, iż analiza "Hot Spot" nie pozwala uwzględnić efektów wywołanych przez SWC. Zaleta tej metody jest fakt, że podczas analizy całej złożonej struktury potrzebnych jest znacznie mniej wykresów zmęczeniowych σ-N. Należy jednak podkreślić, że takie podejście do analizy zmęczeniowej jest słuszne jedynie dla przypadków, kiedy pęknięcie zmęczeniowe rozwija się od brzegu spoiny [64]. Najbardziej krytyczne punkty, z których to rozpoczyna się propagacja pęknięcia zmęczeniowego i które są możliwe do wyznaczenia przy pomocy opisywanej wcześniej metody nazwano "hot spot-ami". Zostały one opisane między innymi przez Wolfganga Fricke w publikacjach [65,66], tak jak przedstawiono na Rys. 25.



Rys. 25. Trzy podstawowe rodzaje punktów "Hot Spot" [66]

W zaleceniach Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa "IIW" metoda szacowania trwałości zmęczeniowej "Hot Spot" jest jedynie metodą alternatywną wprowadzającą dwa zasadnicze punkty propagacji pęknięcia [52]. Powodem tego jest rozkład naprężeń konstrukcyjnych w punktach hot spot (a) i (c), który można określić w kierunku grubości płyty jako sumę naprężeń normalnych pochodzących od rozciągania bądź ściskania, równomiernie rozłożonych w grubości płyty (membrana) i naprężeń wywołanych zginaniem. Rozstaw naprężeń w punkcie (b) powinien być wyznaczony wzdłuż krawędzi płyty [58]. Naprężenie wyliczone tą metodą w punkcie na brzegu spoiny nazywa się naprężeniem hot spot albo naprężeniem strukturalnym. Stosowanie metody "Hot Spot" do szacowania trwałości zmęczeniowej złożonych struktur spawanych stało się bardzo powszechne. Szczególny wpływ na to miało rozpowszechnienie MES do szacowania trwałości zmęczeniowej. Ponadto stosowanie MES wpłynęło na poszerzenie zakresu możliwości stosowania metodyki "Hot Spot".

Należy jednak pamiętać, że wynik analizy MES jest bardzo wrażliwy na zastosowaną siatkę podziału konstrukcji. Jest to spowodowane tym, że analizowany hot spot znajduje się w miejscu występowania wysokich gradientów odkształcenia. Wartości naprężenia mogą się znacznie różnić w zależności od rodzaju i wielkości siatki podziału elementu oraz od procedury zastosowanej do określenia naprężeń. Z tego też powodu niezbędna jest metoda oceny jakości i poprawności uzyskanych wyników obliczeń naprężeń. Dotyczy to głównie weryfikacji punktów, w których wyniki mają istotne znaczenie dla trwałości zmęczeniowej. Zalecenia Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa "IIW" w sposób wyczerpujący dostarczają informacji odnośnie do zasad i rekomendacji dla stosowania naprężeń strukturalnych w punktach hot spot. Dotyczą one szczególnie stosowania takich elementów jak: rozmiar siatki podziału, typ elementu siatki czy punkt odniesienia [47]. W Eurokodze 3 metoda ta jest proponowana jako alternatywna metoda oceny trwałości zmęczeniowej. W Eurokodzie natomiast jest brak zaleceń i wyznaczników do posługiwania się tą metodą, takich jak: techniki modelowania i ekstrapolacji oraz typ punktów hot spot. Eurokod 3 zawiera za to opisy pewnych szczegółów konstrukcyjnych zawierających odpowiedni wykres zmęczeniowy [67].

Naprężeń "Hot Spot" nie można wyznaczyć w sposób bezpośredni w wyniku analizy MES. Do wyznaczenia naprężeń "Hot Spot" na brzegu lica spoiny wykorzystywane są dwie metody ekstrapolacji prowadzonej przez dwa punkty (R1, R2 - Rys. 26). Jest to ekstrapolacja liniowa oraz ekstrapolacja wykładnicza. Można również zastosować prostszą metodę wyliczania naprężeń w punkcie "Hot Spot" w miejscu 0,5t od brzegu lica spoiny poprzez pomnożenie naprężeń strukturalnych przez odpowiedni współczynnik [68,69].



Rys. 26. Graficzne przedstawienie wartości naprężeń "Hot Spot", $\Delta \sigma_{hs}$ –zakres naprężeń "Hot Spot"

Modele MES musza być tworzone tak aby od samego poczatku umożliwiały uzyskanie możliwie dobrych wyników [70]. Modele MES są tworzone przy założeniu idealnej geometrii struktur, w której nie występują różnego rodzaju nieciągłości i spiętrzenia naprężeń. Można je uwzględnić poprzez przyjęcie odpowiednich współczynników wzrostu napreżenia. Ich wartości można znaleźć w różnych wytycznych i przepisach dedykowanych dla danego typu projektowanych konstrukcji. Należy podkreślić, że opracowanie dokładnego modelu odwzorowującego obiekt rzeczywisty jest bardzo trudne w przypadku spawanych obiektów wielkogabarytowych. Wiele ośrodków naukowych na świecie podejmuje wysiłki dotyczące opracowania alternatywnych metod określania naprężenia Hot Spot, które byłyby niewrażliwe na nieodpowiednio dobraną siatkę. Jedną z takich propozycji jest koncepcja linearyzowanego rozkładu naprężeń strukturalnych na grubości płyty, zmodyfikowana przez badaczy kierowanych przez Dong'a z Instytutu w Battelle [71,72]. Celem ich pracy było lepsze dopasowanie wyników badań zmęczeniowych różnych typów połączeń spawanych i wymiarów do pojedynczego wykresu naprężenia "Hot Spot" w funkcji liczby cykli N. Metoda naprężeń strukturalnych Battelle opiera się na ocenie naprężeń strukturalnych na brzegu lica spoiny przy wykorzystaniu wyników uzyskanych metodą elementów skończonych oraz zasad elementarnej mechaniki konstrukcji, takich jak równowaga sił i momentów w przekrojach przez grubość płyty (Rys. 27).



Rys. 27. Liniowy rozkład naprężeń w spoinie według metody Batelle [73]

Ze względu na równoważne warunki naprężeniowe na płaszczyznach odniesienia, naprężenie strukturalne na krawędzi spoiny można uzyskać przy niewielkiej odległości δ od stopy spoiny wyrażonej jako superpozycja membrany i elementów zginających. Naprężenie równoważne naprężeniu strukturalnemu w stopie spoiny uzyskuje się przez sumę dwóch składników naprężeniowych, naprężenia membrany i naprężenia normalnego pochodzącego od zginania [74]:

$$\sigma_{str} = \sigma_m + \sigma_g \tag{2}$$

Jak wspomniano wcześniej, podejście według metody naprężeń strukturalnych Battelle zostało uznane jako niewrażliwe na siatkę. Jednak badania weryfikacyjne przeprowadzone przez wielu autorów [73] wykazały, że niewrażliwość na siatkę została potwierdzona jedynie w przypadku prostych struktur 2D, w których występują podstawowe połączenia spawane takie np. jak połączenie spawane na zakładkę. Natomiast w przypadku struktur złożonych 3D metoda ta jest wrażliwa na siatkę i wymaga zachowania dużej ostrożności podczas ostatecznego doboru cech konstrukcyjnych.

Inną koncepcję zaproponowali Xiao i Yamada [75]. Przyjęli, że wartość naprężenia w punkcie jest proporcjonalna do grubości spawanej płyty. Podejście to zostało poddane weryfikacji dla nieobciążających spoin pachwinowych wykonywanych po obu stronach poprzecznych i wzdłużnych mocowań. Noh i Ji Song [76] wykazali, że koncepcja ta ma również zastosowanie do oceny trwałości zmęczeniowej spoin pachwinowych krzyżowych W połączeniach z uwzględnieniem spoin częściowych i z pełnym przetopem. Aby określić naprężenie w danym punkcie wymiar elementu wokół obszaru spoiny nie powinien przekraczać 1 mm. Prowadzi to do powstawania bardzo dużych modeli MES, które ograniczaja ich praktyczne zastosowanie. Problem można rozwiazać za pomocą techniki sub-modelowania. W badaniach porównawczych W. Frickego i A. Kahla [77] wykazano, że metoda ta bardzo dobrze uwzględnia efekt skali. Rozrzut wyników obliczeń uzyskanych tą metodą był mniejszy niż w przypadku tradycyjnej metody strukturalnego naprężenia "Hot Spot" i metody naprężenia strukturalnego Battelle. Jednak w przypadku tej metody zaleca się stosowanie elementów skończonych pierwszego rzędu. Powodem tego jest to, że środkowy węzeł w elementach drugiego rzędu powoduje zmniejszone naprężenia przy dolnej krawędzi. W elementach pierwszego rzędu środkowy węzeł nie istnieje, a zatem zmniejszenie naprężenia jest ograniczone. Wyniki uzyskane metodą MES z wykorzystaniem pierwszego rzędu były konsekwentnie zgodne z wynikami testu zmęczeniowego. Wadą tej metody jest to, że metoda ta nie ma zastosowania w przypadku pęknięć rozwijających się od grani spoiny.

Nakłady pracy niezbędne podczas obliczeń metodą elementów skończonych z elementami bryłowymi na badanych detalach krawędzi blach są niewspółmiernie duże do uzyskanych efektów. Naprzeciw temu wychodzą normy Eurokod 3. Biorąc pod uwagę naprężenie w punkcie Hot Spot IIW zaleca stosowanie dwóch różnych krzywych zmęczeniowych w zależności od długości zamocowanych blach. Przykładowo zgodnie z kodem FAT100 powinien być on stosowany, gdy długość dołączonych blach jest równa lub mniejsza 100 mm, w przeciwnym razie należy użyć FAT90. Powodem tego jest fakt, że gdy dołączona blacha jest krótsza połączenie spawane jest złączem nienośnym, a zatem spoinę definiuje się jako spoinę nienośną, która jest sklasyfikowana jako FAT100. Gdy dołączona blacha jest dłuższa na złącze spawane ma znaczny wpływ obciążenie, a spoina staje się spoiną przenoszącą obciążenie, która wtedy jest sklasyfikowana jako FAT90.

Analiza wyników badań zmęczeniowych połączeń spawanych, w których nie uwzględniano długości dołączonych blach pokazuje, że kategoria zmęczeniowa W przypadku krótszych długości blach należy zastosować FAT100, a dla długości blach dłuższych niż 100 mm należy użyć FAT90.

Metoda efektywnego karbu

Metoda efektywnego karbu oparta jest na obliczonym najwyższym naprężeniu sprężystym w punktach prawdopodobnej inicjacji pęknięć. Metodę tę zaproponował Radaj [56], który wziął pod uwagę uśrednione naprężenia w teorii mikro-podpór zgodnie z regułą Neubera z fikcyjnym promieniem 1 mm dla grubości blachy 5 mm i powyżej. Promień karbu, jak pokazano na Rys. 28, oblicza się przy założeniu najgorszych warunków dla połączeń spawanych ($\rho = 0$). Oczywiście rzeczywisty promień karbu jest bardzo zróżnicowany.



Rys. 28. Koncepcja mikro-podpór w złączu spawanym według Neubera [78]

Kiedy długość mikro-podpór (ρ) jest równa 0,4 mm przy współczynniku (s) wynoszącym 2,5 dla elementów stalowych, końcowy promień zaokrąglenia wyniesie 1 mm (dla tego konkretnego obliczenia promienia odniesienia). W przypadku mniejszych grubości blachy Zhang [79] zaproponował użycie fikcyjnego promienia 0,05 mm, który opiera się na zależności między współczynnikiem spiętrzenia naprężeń a naprężeniem na dnie karbu. Wyznaczone w oparciu o tę metodę naprężenia przyjęto nazywać naprężeniami efektywnymi występującymi tylko przy założeniu materiału liniowo-sprężystego. Na Rys. 29 pokazano schematycznie sposób parametryzacji modelu.



Rys. 29. Miejsca modelowania karbu efektywnego

W przypadku analizy zmęczeniowej połączeń spawanych przy użyciu jednostkowego promienia zaokrąglenia, geometryczne detale wokół obszaru koncentracji naprężeń powinny mieć wystarczające zagęszczenie elementów, aby uwzględnić maksymalne naprężenie w punkcie koncentracji naprężeń. Najważniejszą zasadą dla tej metody jest to, aby geometria szczegółów wokół przewidywanych regionów inicjacji pęknięć była modelowana z możliwie dużą dokładnością, którą można uzyskać za pomocą modeli bryłowych 3D. Modele elementów skończonych oparte na elementach 2D mogą być stosowane w przypadkach, w których obciążenie i geometria są wystarczająco proste. Podejście do zastępczego promienia zaokrąglenia zawarte jest w zaleceniach IIW

jako alternatywna metoda oceny zmęczenia z zaleceniami dotyczącymi modelowania elementów skończonych i wykorzystywanego wykresu zmęczeniowego S-N.

Prace [47] i [45] zawierają wiele propozycji opisów metod obliczeń efektywnego promienia, jak również opisy i wyniki analizy realizowanej zgodnie z wytycznymi IIW. W pracy [80] Sonsino zaproponował, że przy obliczaniu efektywnego karbu (promienia zaokrąglenia) w oparciu o maksymalne naprężenie główne należy zastosować wykres zmęczeniowy FAT225, natomiast wykres zmęczeniowy FAT200 należy zastosować przy uwzględnieniu naprężenia von Misesa. Maksymalne naprężenie główne zalecane jest w przypadku naprężeń wieloosiowych i stali ciągliwych (np. stale konstrukcyjne). Natomiast kryterium naprężeń von Misesa stosuje się w przypadku materiałów kruchych, takich jak żeliwo [56]. Naprężenia w zastępczym promieniu zaokrąglenia na krawędzi spoiny autorzy badali z wykorzystaniem techniki submodelowania. Jest to spowodowane bardzo wąskim obszarem wokół punktów krytycznych (Rys. 30), który był wymagany do uchwycenia maksymalnego naprężenia sprężystego (Rys. 31).



Rys. 30. Interpretacja rozkładu naprężeń wg metody karbu efektywnego



Rys. 31. Model efektywnego karbu

Technika submodelowania może umożliwić połączenie więcej niż jednego submodelu ze sobą jako połączenie szeregowe. Na podstawie badań literaturowych i prac ewaluacyjnych przeprowadzonych w ramach poniższej pracy w Tab. 2 zestawiono zalety i wady metod oceny trwałości zmęczeniowej.

Zalety	Wady
Analiza naprężeń normalnych	
 Analiza napr proste obliczenia dobrze zdefiniowane i dobrze znana metoda powszechne stosowanie duża dostępność danych eksperymentalnych dostępne formuły parametryzacji dostępne klasy zmeczeniowe w koda 	 zależność kategorii zmęczenia od szczegółów ograniczenie poprzez nieuwzględnienie zmian strukturalnych materiału mniejsza dokładność w złożonych strukturach nie uwzględnia efektu grubości
 dostępne klasy znięczeniowe w koda projektowych nadaje się do analiz stopy lica i grani Ana 	aliza Hot Spot
 wymagana mała ilość krzywych S-N wykorzystanie istniejącej analizy naprężeń z akceptowalną dokładnośc mniejsze nakłady na modelowanie M uwzględnianie efektów makro- geometrycznych wykorzystywana do konstrukcji rurowych od wielu lat 	 zależność od rozmiaru elementu zależność od rozmieszczenia elementów różne procedury wyznaczania naprężeń brak uwzględnienia efektu grubości ograniczone do analiz pęknięć stopy lica
Analiza zastępczego promienia zaokrąglenia	
 uwzględnia wpływ grubości nie podlega wpływowi kierunku naprężeń stosowana do analiz pęknięć od stror lica i grani wymaga pojedynczej krzywej S-N 	 użyteczność jedynie w przypadku analiz MES zależność od gęstości siatki zależność od wielkości promienia czasochłonny proces modelowania i analiz duże modele

Tab. 2. Wady i zalety metod oceny trwałości zmęczeniowej

b) Podejście odkształceniowe

Pojęcie elementu konstrukcyjnego wiąże się nierozłącznie z problemem karbów powstałych ze względów funkcjonalnych lub na skutek różnego rodzaju zabiegów technologicznych. W obszarach karbów w wyniku występujących obciążeń dochodzi do spiętrzenia naprężeń i możliwe jest lokalne uplastycznienie materiału. Ze względu na fakt występowania odkształceń plastycznych zaczęły zawodzić tradycyjne metody obliczeń trwałości bazujące na naprężeniach nominalnych. Niezbędna stała się konieczność analizy lokalnych wartości odkształceń i naprężeń. Metoda obliczeń trwałości zmęczeniowej bazująca na analizie lokalnych odkształceń powstała na przełomie lat 50. i 60. XX w. jako sposób oceny zmęczenia niskocyklowego części reaktorów atomowych i silników odrzutowych [4]. Obecnie znajduje swoje odzwierciedlenie w odkształceniowym lub energetycznym opisie procesu zmęczenia. Podstawą realizacji obliczeń w obydwu ujęciach jest znajomość własności materiałowych w postaci odpowiedniego wykresu zmęczeniowego oraz przyjęcie odpowiedniej hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych.

W metodzie szacowania trwałości zmęczeniowej opartej na analizie odkształcania i naprężenia, trwałość elementu jest obliczana na podstawie stanu odkształcenia w niewielkich obszarach karbów konstrukcyjnych np. spoin. Jej podstawą jest znajomość przebieg zmian odkształceń lokalnych. W metodzie uwzględnia się reakcje materiału w obszarach lokalnego uplastycznienia. Z tego względu do obliczenia odpowiedzi materiału wymagane jest nie tylko naprężenie nominalne i odkształcenie sprężyste, ale niezbędna jest również znajomość zależności pomiędzy cyklicznym naprężeniem i odkształceniem, w której występują odkształcenia plastyczne. Podstawową charakterystyką opisującą własności cykliczne w obszarze niskocyklowego zmęczenia określaną na podstawie badań doświadczalnych jest zależność pomiędzy σ_a i ε_{ap} . Dla metali i ich stopów przyjęto założenie, że odkształcenie plastyczne ε_{ap} jest funkcją potęgową naprężenia σ_a o postaci:

$$\varepsilon_{ap} = \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \tag{3}$$

Zależność między amplitudami naprężenia σ_a i odkształcenia ε_{ap} z okresów stabilizacji dla kilku poziomów odkształcenia ε_{ac} lub naprężenia σ_a przedstawia się graficznie w postaci wykresu w bilogarytmicznym układzie współrzędnych σ_a i ε_{ap} . W przypadku braku okresu stabilizacji niezbędne do wykonania wykresu parametry pętli histerezy σ_a i ε_{ap} pobiera się z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej. Wykres przedstawiający zależność pomiędzy σ_a i ε_{ap} można uzyskać wykonując badania na kilku poziomach odkształcenia z wykorzystaniem kilku próbek (metoda klasyczna zgodna z [81]). Do analitycznego opisu cyklicznych własności materiału wykorzystuje się modele jedno- lub dwuparametrowe [82].Niektóre z nich poddano weryfikacji w pracy [83] Najczęściej stosowanym podczas analizy zmęczeniowej konstrukcji jest model Ramberga – Osgooda [83], o postaci:

$$\varepsilon_{ac} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \tag{4}$$

Modyfikacja modelu Ramberga-Osgooda [84], [85] polega na przyjęciu założenia, że istnieje cykliczna granica plastyczności σ_{cpl} poniżej której materiał

można traktować jako liniowo sprężysty, co pozwala zapisać zależność (4) w postaci:

$$\varepsilon_{ac} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a - \Delta \sigma_{cpl}}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} dla \ \sigma_a > \sigma_{cpl} \ oraz \ \varepsilon_{ac} = \frac{\sigma_a}{E} \ dla \ \sigma_a > \sigma_{cpl}$$
(5)

Przy wykorzystaniu prostych modeli analitycznych istnieje możliwość opisu odpowiednich gałęzi pętli histerezy. Równanie rosnącej gałęzi pętli histerezy otrzymuje się mnożąc zależność (4) przez dwa:

$$\Delta \varepsilon_{ac} = \frac{\Delta \sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'}\right)^{\frac{1}{n'}} \tag{6}$$

Gałęzie malejące pętli otrzymuje się stosując równanie (6) po transformacji układu współrzędnych do górnego wierzchołka pętli. Powyższą metodę postępowania omówiono szczegółowo w literaturze np. [86]. Zależność pomiędzy odkształceniem i naprężeniem o postaci opisanej równaniem (6) stosuje się do opisu pętli histerezy materiałów podlegających zasadzie Masinga [87]. Dla materiałów niepodlegających zasadzie Masinga zdefiniowano tzw. wykres szkieletowy, który tworzą górne lub dolne gałęzie pętli histerezy. Wykres ten otrzymuje się przez przemieszczenie poszczególnych pętli histerezy wzdłuż ich części liniowej. Początek układu współrzędnych przyjmuje się w dolnym punkcie najmniejszej pętli. Zasadę Masinga oraz szczegóły konstrukcji wykresu szkieletowego wyjaśniono szczegółowo między innymi w pracach [87,88]. Dla materiału nie podlegającego zasadzie Masinga zależność pomiędzy odkształceniem i naprężeniem przyjmuje postać:

$$\Delta \varepsilon_{ac}^* = \frac{\Delta \sigma^*}{E} + 2\left(\frac{\Delta \sigma^*}{2K^*}\right)^{\frac{1}{n^*}} \tag{7}$$

Przy obciążeniu cyklicznym zachowanie materiału jest podobne do przedstawionego na Rys. 32. Pętla histerezy jest wynikiem testów eksperymentalnych, podczas których pomiarowi podlega odkształcenie i siła (naprężenie).

Aby opisać wykres cyklicznego odkształcenia należy wykonać testy eksperymentalne na kilku różnych amplitudach stałego odkształcenia z wykorzystaniem gładkich próbek (bez karbu). Istnieją pewne uproszczone metody określania cyklicznej krzywej cyklicznego odkształcenia na jednej próbce [83]. Przyjmując wszystkie poziomy naprężenia z ustabilizowanych pętli histerezy przy różnych amplitudach odkształceń można określić krzywą cyklicznego umocnienia w układzie naprężenie-odkształcenie, jak to przedstawiono na Rys. 33. Parametry występujące w zależności (3) takie jak *K*' oraz n' są wyznaczane z krzywej opisanej na wyznaczonych punktach.



Rys. 32. Odpowiedz materiału na obciążenie cykliczne



Rys. 33. Krzywa cyklicznego odkształcenia

Krzywa cyklicznego odkształcenia pozwala na obliczenie lokalnych odkształceń w obszarze koncentracji naprężeń (dno karbu). Jednak w praktyce lokalne wartości naprężeń na wierzchołku karbu nie są znane. Znana jest wartość naprężenia nominalnego, którą można obliczyć z tradycyjnych metod, a koncentrację naprężeń dla konkretnej zmiany geometrii można również określić na podstawie obliczeń metodą elementów skończonych. Istnieją dwie metody, które służą do obliczenia lokalnego naprężenia i odkształcenia dla miejscowego odkształcenia plastycznego w samym wierzchołku karbu.

W metodzie obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych opartych na analizie odkształceń, trwałość jest bardzo ściśle uzależniona od amplitudy lokalnego odkształcenia w miejscu inicjacji pęknięcia. Lokalne odkształcenia i naprężenia ε_a i σ_a trzeba oszacować w miejscu prawdopodobnej inicjacji pęknięcia (np. dno najostrzejszego karbu). Obecnie istnieje kilka koncepcji ich wyznaczania. Do najbardziej znanych należy koncepcja Stowella (1950 r.), zmodyfikowana przez Hardratha i Ohmana (1953 r.) oraz koncepcja Neubera (1961 r.). Najczęściej stosowana jest propozycja Neubera, która wiąże naprężenia lokalne σ_{lok} i nominalne σ_n w karbie za pomocą współczynników spiętrzenia naprężeń K_{σ} i odkształceń K_{ε} [89]. Według Neubera kwadrat współczynnika kształtu karbu K_t oblicza się jako iloczyn współczynnika K_{σ} i K_{ε} .

$$K_t^2 = K_\sigma \cdot K_\varepsilon \tag{8}$$

Odkształcenie maksymalne ε na dnie karbu odpowiada naprężeniu σ , a odkształcenie nominalne ε_n naprężeniu nominalnemu σ_n . Równanie (8) można zapisać w postaci:

$$\sigma \cdot \varepsilon = K_t^2 \cdot \sigma_n \cdot \varepsilon_n \tag{9}$$

Dla zakresu sprężystego zależność (9) przyjmuje postać opisaną hiperbolą Neuber'a [90] przedstawioną za pomocą równania (10). Zostało ono wzbogacone o naprężenia pospawalnicze σ_r które sumują się z naprężeniami nominalnymi σ_n :

$$\frac{(K_t \cdot \sigma_n + \sigma_r)^2}{E} = \sigma \cdot \varepsilon \tag{10}$$

2.3.3. Obliczenia trwałości zmęczeniowej z wykorzystaniem danych z zakresu niskocyklowego zmęczenia

Ocena trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych w ujęciu odkształceniowym wymaga przyjęcia szeregu danych materiałowych. Określa się je podczas badań niskocyklowych próbek gładkich poddanych zmiennym odkształceniom lub naprężeniom. W metodzie obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych przyjmuje się, że jeżeli próbka gładka zostanie poddana takiemu przebiegowi odkształceń jak element konstrukcyjny w obszarze karbu, to jego trwałość będzie równa trwałości próbki gładkiej. Przyjęty w metodzie obliczeń trwałości sposób modelowania odkształceń w karbie pokazano w sposób schematyczny na Rys. 34.



Rys. 34. Modelowanie elementu konstrukcyjnego w obszarze karbu za pomocą próbki gładkiej obciążonej osiowo

W pracach [91, 92, 93, 94] podjęto próbę modelowania odkształceń w karbie przy wykorzystaniu próbki poddanej zginaniu. Analiza porównawcza wyników obliczeń trwałości uzyskanej przy wykorzystaniu danych ze zginania i obciążenia osiowego wykazała wpływ metody wyznaczania danych materiałowych na wyniki obliczeń. Mniejsze zróżnicowanie wyników obliczeń i badań stwierdzono w przypadku wykorzystywania w nich danych uzyskanych w warunkach zginania.

Wykres zmęczeniowy wykorzystywany podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych w ujęciu odkształceniowym wykonuje się na podstawie niskocyklowych badań zmęczeniowych zgodnie z [81]. Najbardziej znanym opisem wykorzystywanym podczas opracowywania uzyskanych wyników jest równanie Mansona-Coffina-Basquina [83, 84, 86]:

$$\frac{\Delta\varepsilon_{ac}}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_{ae}}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_{ap}}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \tag{11}$$

Na Rys. 35 pokazano w sposób schematyczny interpretację graficzną parametrów w równaniu (11).

Wykres $\varepsilon_{ac}=f(2N_f)$ dla różnych materiałów ma różny przebieg. Jednak prawie zawsze zbliża się asymptotycznie w zakresie małej liczby cykli obciążenia do prostej aproksymującej odkształcenia plastyczne, natomiast w zakresie wysokocyklowym do prostej określonej przez zmiany amplitudy odkształceń sprężystych. W literaturze spotkać można prace [83], [93], w których odkształcenia całkowite aproksymowano liniami prostymi uzyskując wysoki współczynnik korelacji. Punkt przecięcia się prostych ε_{ae} i ε_{ap} nazywany jest punktem przejściowym, a odpowiadająca mu liczba cykli N_f lub nawrotów $2N_f$ określana jest jako przejściowa liczba cykli N_t albo nawrotów $2N_t$.



Rys. 35. Wykres zmęczeniowy w ujęciu odkształceniowym

Dla każdej zamkniętej pętli histerezy, która reprezentuje cykl obciążenia, trwałość zmęczeniowa może być obliczona za pomocą wykresu opisanego równaniem (11). Uszkodzenia spowodowane jednym cyklem można obliczyć przy wykorzystaniu liniowej hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych (Hipoteza Palmgrena–Minera [95]). Łączne uszkodzenie po zrealizowaniu N_{fi} cykli będzie równe:

$$D = \sum D_i = \sum \frac{1}{N_{fi}} \tag{12}$$

Całkowitą liczbę cykli lub powtórzeń bloków historii obciażenia aż do momentu zniszczenia (inicjacji pęknięcia) można obliczyć z zależności:

$$L_R = \frac{1}{D} \tag{13}$$

Na Rys. 36 przestawiono w formie graficznej metodykę odkształceniowego podejścia do szacowania trwałości zmęczeniowej.



Rys. 36. Postępowanie podczas analizy połączeń spawanych w metodzie odkształceniowej

Na Rys. 9 pokazano w jaki sposób naprężenia spawalnicze wpływają na wartość naprężeń średnich. W celu uwzględnienia podczas sumowania uszkodzeń naprężeń średnich wprowadzono modyfikacje do zależności (11). Trzy najbardziej znane modyfikacje to propozycje Morrow'a (14), Manson-Halford'a (15) i Smith-Watson-Topper'a (16) [96], [97]:

$$\varepsilon_{ac} = \frac{\left(\sigma_{f}' - \sigma_{m}\right)}{E} (2N_{f})^{b} + \varepsilon_{f}' (2N_{f})^{c}$$
(14)

$$\varepsilon_{ac} = \frac{\left(\sigma_{f}' - \sigma_{m}\right)}{E} (2N_{f})^{b} + \varepsilon_{f}' \frac{\left(\sigma_{f}' - \sigma_{m}\right)^{c}}{\sigma_{f}'} (2N_{f})^{c}$$
(15)

$$\sigma_{max} \varepsilon_{ac} = \frac{\left(\sigma_f'\right)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \varepsilon_f' (2N_f)^{b+c}$$
(16)

2.4. WPŁYW SPOIN NA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE OBIEKTU

2.4.1. Badania na próbkach materiałowych

a) Wytrzymałość połączeń spawanych

Na podstawie dostępnej wiedzy można stwierdzić, że prawidłowo wykonane spoiny nie powodują obniżenia podstawowych parametrów wytrzymałościowych określanych w próbie statycznego rozciągania. W pracy [98] przeprowadzono badania wytrzymałościowe próbek ze stali18G2A, które potwierdziły ten fakt. Próbki jednorodne (bez spoin) oraz próbki zawierające spoiny wycięto z ceownika 180E. Sposób przygotowania próbek pokazano na Rys. 37. W celu uniknięcia występowania karbu geometrycznego przed wycięciem próbek z ceownika poddano go obróbce mechanicznej mającej na celu usunięcie lica spoiny oraz grani.





Podczas prób statycznego rozciągania pęknięcia próbek zawierających spoinę występują zawsze poza obszarem spoiny. Na Rys. 38 pokazano widok próbek ilustrujących postać i miejsce powstałych pęknięć.

Przewężenie, a następnie pęknięcie próbki zawierającej spoinę zostało zlokalizowane w materiale jednorodnym poza spoiną. Wyniki badań uzyskane podczas prób rozciągania próbek zawierających spoiny oraz bez spoin pokazano na Rys. 39 w formie wykresów rozciągania w układzie wydłużenie próbkinaprężenie. Naprężenie chwilowe w próbce obliczano dzieląc wartość chwilowego obciążenia próbki przez jej pole przekroju początkowego S₀.

Analiza porównawcza podstawowych parametrów wytrzymałościowych uzyskanych w próbie statycznego rozciągania (Rys. 39) pozwala stwierdzić, że wpływ spoiny uwidacznia się w mniejszym wydłużeniu próbki zawierającej spoinę. Próbki jednorodne bez spoin mają wydłużenie zdecydowanie wyższe.

W przypadku pozostałych parametrów (R_{m} , R_{eH} , R_{eL}) występująca spoina nie miała wyraźnego wpływu na uzyskane wartości.



Rys. 38. Położenie przewężenia na próbkach: a) jednorodnych, b) zawierających spoinę



Rys. 39. Wykresy rozciągania próbek ze stali 18G2A bez spoiny oraz ze spoiną [99]

b) Trwałość zmęczeniowa

Spoiny powodują zdecydowane obniżenie trwałości zmęczeniowej połączenia. Zostało to wielokrotnie potwierdzone [5,28,58,66,69,100–102]. W pracy [98] podjęto próbę ilościowego określenia wpływu spoiny na trwałość zmęczeniową. Badania polegały na poddawaniu próbki wykonanej ze stali N80 zawierającej spoinę oraz próbki jednorodnej wahadłowo zmiennemu rozciąganiu-ściskaniu do chwili powstania pęknięcia zmęczeniowego. Odkształcenia próbki mierzono przy wykorzystaniu ekstensometru mocowanego na części pomiarowej. Próby prowadzono do chwili trwałego rozdzielenia próbki w obszarze części pomiarowej. Na Rys. 40 pokazano widok próbki zamocowanej w uchwytach maszyny wytrzymałościowej.



Rys. 40. Próbki zamocowane w uchwytach: a) próbka jednorodna,b) próbka ze spoiną [98]

Na Rys. 41 pokazano charakterystyczne postaci uszkodzeń próbek zawierających spoinę na poziomie naprężenia $\sigma_a = 200$ MPa. Analiza uszkodzeń próbek ze spoiną potwierdza doniesienia literaturowe odnośnie do lokalizacji pęknięć. Inicjacja pęknięć zmęczeniowych następowała zawsze na brzegu lica spoiny. Pęknięcie próbki propaguje następnie prostopadle do osi próbki w strefie wpływów cieplnych.



Rys. 41. Postać uszkodzenia próbek z ze stali N80 ze spoiną [99]

Uzyskane podczas badań wyniki trwałości zestawiono w formie graficznej na Rys. 42, którym naniesiono wykres zmęczeniowy uzyskany podczas badań zmęczeniowych na pięciu poziomach naprężenia próbek jednorodnych oraz uzyskane wyniki trwałości próbek ze spoiną tylko na jednym poziomie obciążenia σ_a =200 MPa.

Analiza uzyskanych wyników badań pozwoliła stwierdzić, że wykonana spoina powoduje bardzo istotne obniżenie trwałości zmęczeniowej. Uzyskane na poziomie obciążenia $\sigma_a = 200$ MPa wyniki trwałości zmęczeniowej próbek ze spoiną są około 7 razy mniejsze w stosunku do wyników trwałości próbek jednorodnych. Należy podkreślić, że w przypadku próbek ze spoiną występował zarówno karb geometryczny (lico spoiny), jak i strukturalny (przetop i zmiany struktury).



Rys. 42. Wyniki badań zmęczeniowych próbek ze stali N80

W pracy [98] przeprowadzono badania, w których w próbkach przed badaniem usunięto karb geometryczny (frezowanie próbki od strony lica i grani). Niejednorodności strukturalne powstałe w wyniku spawania były na tyle istotne, że lokalizacja pęknięć zmęczeniowych miała nadal miejsce w obszarze wpływów cieplnych (karbu strukturalnego). Na Rys. 43 pokazano postać uszkodzenia próbki zawierającej spoinę czołową po badaniu.



Rys. 43. Postać uszkodzeń próbki zawierającej spoinę czołową

Zgodnie z oczekiwaniami pęknięcia w próbkach ze spoiną wystąpiły w obszarze wpływów cieplnych. Lokalizacja pęknięć zmęczeniowych w próbkach zawierających spoinę poza jej obszarem świadczy o wysokiej jakości samej spoiny. Wskazać należy, że w przypadku połączeń spawanych nie zawsze istnieje możliwość obróbki mechanicznej od strony lica, jak i grani.

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. Biura projektowe w celu poszerzenia wiedzy i wzbogacenia bazy danych prowadzą własne badania dotyczące określania trwałości charakterystycznych połączeń spawanych występujących w konstrukcjach. W pracy [103] podjęto próbę oceny ilościowej wpływu określonych połączeń na trwałość. Podczas badań wykorzystywano cztery typy próbek wykonanych ze stali 650. Kształt próbek pokazano na Rys. 44.



Rys. 44. Obiekty badań: a) próbka gładka (typ A), b) ze spoiną wzdłużną (typ B), c) ze spoinami wzdłużnymi (typ C), d) połączenie krzyżowe (typ D)

Próbki poddano zmiennemu odzerowo tętniącemu rozciąganiu (Rys. 45a). Poziomy obciążenia przyjęte do badań określono po analizie wyników prób statycznego rozciągania. Parametry obciążenia zmiennego zestawiono na Rys. 45b.



Rys. 45. Parametry obciążenia zmiennego: a) program, b) parametry obciążenia

Próby zmęczeniowe prowadzono do chwili wystąpienia pęknięcia próbki. Na Rys. 46 pokazano próbki przygotowane do badań zmęczeniowych.





Rys. 46. Próbki podczas badań: a) typ C, b) typ D

Na Rys. 47 pokazano najczęściej obserwowane podczas prób zmęczeniowych postaci uszkodzeń próbek spawanych.



Rys. 47. Postaci uszkodzenia próbek a) typ B, b) typ D

Uzyskane podczas badań zmęczeniowych trwałości zestawiono na Rys. 48 w postaci wykresów zmęczeniowych w układzie liczba cykli do pęknięcia N – naprężenie σ_{max} . Wykresy zmęczeniowe w układzie bilogarytmicznym aproksymowano równaniem o postaci opisanej na Rys. 48.



Rys. 48. Wykresy zmęczeniowe dla różnych węzłów (stal 650)

Na podstawie wykonanych wykresów stwierdzono, że największe obniżenie trwałości zmęczeniowej dotyczy połączenia krzyżowego (Typ D). W stosunku do próbki jednorodnej (Typ A) obniżenie trwałości wynosi kilkaset procent. Powyższe wyjaśniono największym strumieniem energii cieplnej dostarczonej do węzła podczas wykonywania węzła krzyżowego.

2.4.2. Badania zmęczeniowe węzłów spawanych

Wykorzystywanie podczas projektowania konstrukcji spawanych wyników badań prostych próbek materiałowych pozwoliło poprawić skuteczność obliczeń trwałości. Nadal jednak uzyskiwane podczas badań gotowych obiektów wyniki badań były w dużej mierze przypadkowe i okupione znaczą liczbą prób. Jednym z powodów jest fakt, że podczas badań materiałowych na próbkach nie uwzględnia się efektu skali. W próbkach materiałowych w niewielkim stopniu uwypuklają się również omówione wcześniej naprężenia spawalnicze. Na podstawie uzyskanych wyników badań próbek materiałowych można stwierdzić, że w przypadku projektowania złożonych obiektów spawanych nie są już wystarczające informacje uzyskane na podstawie badań materiałowych opisanych w poprzednim punkcie. W celu uogólnienia wniosków dotyczących poprawności zastosowanych materiałów, technologii wytwarzania oraz rozwiązań konstrukcyjnych niezbędne są badania węzłów spawanych. Węzły takie zaczęto przygotowywać zgodnie z technologią stosowaną w produkcji rzeczywistych obiektach. W pracach, [104–106] szeroko omówiono przykłady procedury przygotowywania węzłów spawanych stosowanych w budownictwie okrętowym. Na podkreślenie zasługuje fakt, że badania węzłów prowadzone były zarówno na uniwersalnych maszynach wytrzymałościowych, jak również specjalnie konstruowanych stanowiskach. Wykonywane węzły były modelami o rzeczywistych wymiarach lub wykonywano je w odpowiedniej skali. Było to podyktowane przede wszystkim brakiem dostępu do specjalistycznych stanowisk. Ogólnie dostępne były maszyny wytrzymałościowe z ograniczonym dostępem do przestrzeni badawczej.

W ramach pracy [98] zrealizowano szeroki program badań węzłów występujących w pojazdach szynowych [14]. Węzły odzwierciedlały rzeczywiste rozwiązania stosowane w pojeździe szynowym. Na Rys. 49 pokazano przykładowe postaci badanych węzłów w różnych etapach procesu produkcji.





Rys. 49. Badane węzły: a) węzeł bez poszycia, b) węzeł z poszyciem [98]

Badania zmęczeniowe polegały na poddawaniu węzłów spawanych najczęściej odzerowo tętniącemu zginaniu. Podczas badań w krytycznych obszarach węzłów (spoiny) rejestrowano wartości odkształceń. Ze względu na fakt trudności obciążania takich obiektów wprost na maszynach wytrzymałościowych do realizacji badań wykonano dodatkowe oprzyrządowanie umożliwiające mocowanie węzła na maszynie wytrzymałościowej (Rys. 50).

W skład oprzyrządowania wchodziły dodatkowe elementy pośrednie pozwalające na mocowane obiektów na standardowej maszynie hydraulicznej. Przed zamocowaniem na maszynie wytrzymałościowej w wybranych obszarach węzła mocowano tensometry oporowe. Obszary mocowania tensometrów określono podczas analizy numerycznej tych obiektów (Rys. 51).



Rys. 50. Oprzyrządowanie do badań: a) schemat, b) widok obiektu z oprzyrządowaniem [98]



Rys. 51. Widok tensometrów oporowych

Dodatkowo do pomiaru ugięć statycznych ramion węzłów na skutek ich obciążania (charakterystyki statyczne) wykorzystywano również czujniki zegarowe 1 i 2 mocowane do belki górnej przyrządu. Oprzyrządowanie wraz z węzłem mocowano na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8502. Na Rys. 52 pokazano widok kompletnego stanowiska przygotowanego do badań.

Badania zmęczeniowe węzłów, podobnie jak badania gotowych obiektów, prowadzono do chwili powstania widocznego pęknięcia zmęczeniowego badanej próbki. Po naprawie węzła podlegały one dalszym badaniom zmęczeniowym. Przyjęta metodyka postępowania podczas badań węzłów była taka sama jak podczas badań gotowych obiektów.

Podczas badań obserwowano zjawisko nieznacznego umocnienia materiału. Polegało ono na tym, że po zrealizowaniu pierwszego cyklu obciążenia w kolejnych podczas realizacji tego samego obciążenia obserwowano mniejsze przemieszczenie tłoka. Proces ten trwał w zależności od rodzaju węzła od kilku do kilku tysięcy cykli. Po tym okresie występowało już cykliczne pełzanie ramion węzła. Obciążenie zmienne o niezmiennej wartości siły obciążającej powodowało coraz większe ugięcia ramion węzła. Podczas badań potwierdzono również redystrybucją naprężeń spawalniczych podczas kilku pierwszych cykli obciążenia.



Rys. 52. Stanowisko przygotowane do badań: a) widok, b) stosowany program obciążenia

Analiza wszystkich powstałych pęknięć zmęczeniowych wykazała, że zgodnie z oczekiwaniami powstały one w obszarach spoin pachwinowych łączących ramiona węzła z korpusem. Inicjacja pęknięcia miała miejsce w obszarze maksymalnych naprężeń gnących (rozciągających). Pęknięcie rozwijało się w płaszczyźnie styku ramienia z korpusem. Najczęściej był to obszar spoiny (tzw. obszar wpływów cieplnych). Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzić można, że pęknięciu ulegało zarówno poszycie struktury (blacha o grubości 1,5 mm), jak i sam profil.

Na podstawie przeprowadzonej 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.

2.4.3. Badania gotowych obiektów – warunki badań i aparatura

a) Wprowadzenie

Badania zmęczeniowe wielkogabarytowych konstrukcji kolejowych, maszyn roboczych, struktur okrętowych stanowią specyficzną grupę badań. Ze względu na gabaryty badania takie prowadzi się 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 Badań Technologiczno-Wytrzymałościowych na Wydziale Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej). 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.

Badania zmęczeniowe całych struktur (np. skrzydło samolotu, burta statku, pojazd szynowy) stwarzają wiele problemów technicznych. Trudności dotyczą np. odwzorowania rzeczywistych obciążeń tych elementów. W warunkach rzeczywistych np. obciążenia aerodynamiczne samolotu czy pochodzące od oddziaływania falowania morza są rozłożone na całych powierzchniach samolotu czy statku. Z tego względu w warunkach laboratoryjnych poza tunelem aerodynamicznym czy specjalnym basenem wodnym bardzo trudno odwzorować tego typu obciążenie. Podczas prób statycznych oraz zmęczeniowych obciążenia aerodynamiczne zastępowane są najczęściej siłami skupionymi przykładanymi poprzez specjalne przylepce lub elementy sztywne (Rys. 53).



Rys. 53. Badania zmęczeniowe skrzydła samolotu: a) schemat obciążenia, b) widok stanowiska

W celu ograniczenia liczby siłowników obejmy łączy się dźwigniami. Aby układy dźwigniowe mogły przenosić obciążenia dwukierunkowe, stosuje się specjalne połączenia dźwigni z użyciem podatnych elementów, np. gumowych. Jednakże liczba "poziomów" układów dźwigniowych jest ograniczona, zwykle do trzech. Z powodu dużej odkształcalności konstrukcji lotniczych obejmy obciążone są one siłą prostopadłą do jej płaszczyzny. Dlatego obejmy należy zabezpieczyć specjalnymi elementami przed kołysaniem, które mogłoby powodować lokalne silne obciążenie badanej struktury. Siły skupione muszą być przykładane z zachowaniem właściwej fazy między nimi. Do ich realizacji stosuje się zwykle siłowniki hydrauliczne. Serwohydrauliczne systemy obciążające w połączeniu z technikami komputerowymi dają najbardziej rozwinięte możliwości realizacji obciążeń. Są to rozbudowane systemy wielokanałowe. Sam obiekt badań czyni się nieważkim. Siły czynne (siły aerodynamiczne, ciąg silników) i bierne (siły bezwładności pochodzące od masy własnej struktury, masy paliwa, masy ładunków użytecznych, w tym uzbrojenia) są symulowane przez siłowniki. Odciążane są również wszystkie części układu obciążającego: obejmy, układy dźwigniowe, cięgna, siłomierze, ruchome części siłowników itd.

b) Przykłady badań obiektów spawanych w laboratoriach UTP

Badania lekkich ram spawanych

W zakresie rozwoju stanowisk do badań obiektów spawanych istotne osiągnięcia ma Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy (dawniej Akademia Techniczno-Rolnicza). Oprócz bardzo odpowiedzialnych i złożonych struktur takich jak rama pojazdu szynowego czy maszyny roboczej badaniom w skali 1:1 podlegają również w miarę proste obiekty techniczne takie jak np. pojazdy jednośladowe czy samochodowe. W latach 1970-1991 w Laboratorium Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn prowadzono szeroki program badań elementów pojazdów jednośladowych [98]. Mimo nieustannego rozwoju alternatywnych metod łączenia rur (np. klejenie) oraz zastosowania nowych materiałów, w procesie produkcyjnym pojazdów jednośladowych nadal najpowszechniejszą metodą łączenia zespołów i elementów jest spajanie - jako metoda stosunkowo tania i łatwa do stosowania w skali przemysłowej [107]. Zastosowane w obiektach spoiny są miejscami spiętrzenia naprężeń i związanego z tym znacznego osłabienia materiału i występowania bardzo niebezpiecznych pęknięć [108]. Z tego względu obiekty te poddaje się w trakcie procesu konstruowania badaniom statycznym i zmęczeniowym w warunkach odzwierciedlających warunki ich eksploatacji [109]. Do badań tych obiektów przygotowano w ośrodku bydgoskim specjalistyczne stanowiska badawcze. Na Rys. 54 pokazano przykładowe stanowisko

do badań widelców rowerowych.



Rys. 54. Stanowisko do badań widelców rowerowych: a) widok, b) schemat

Do uzyskania sinusoidalnie zmiennej siły obciążającej widelec stosowano proste i tanie systemy obciążenia. Były to różnego rodzaju wibratory bezwładnościowe i kinematyczne. W wibratorze bezwładnościowym siła obciążająca zależy od prędkości obrotowej silnika. Siłę obciążającą widelec mierzono przy wykorzystaniu przetwornika tensometrycznego. Podczas badań do określania granicy zmęczenia widelców rowerowych stosowano metodę Locati [110]. Na Rys. 55 pokazano przykładowe pęknięcia badanego widelca. Zgodnie z oczekiwaniami inicjacja pęknięcia zmęczeniowego następowała w obszarze występowania maksymalnych naprężeń gnących i strefy lica spoiny. Podczas prowadzonych badań wielokrotnie potwierdzano, że wpływ na wynik końcowego badania ma np. technologia spawania i jakość spoin.



Rys. 55. Pęknięcia zmęczeniowe widelca: a) położenie pęknięcia, b) postać

Podobnym badaniom jak widelce poddawano również kompletne ramy rowerowe oraz motorowerowe. Badania zmęczeniowe tych obiektów prowadzono również na specjalnych stanowiskach. Do realizacji obciążeń zmiennych oprócz wibratorów bezwładnościowych zastosowano wibratory kinematyczne. Obciążenia w obiekcie typu rama zadano poprzez węzeł korbowy. Na Rys. 56 pokazano widok stanowiska do badań ram pojazdów jednośladowych.

Badania prowadzono zarówno w warunkach obciążeń stałoamplitudowych, jak również programowanych. Obliczenia granicy zmęczenia, podobnie jak w przypadku widelców rowerowych, prowadzono metodą Locati.



Rys. 56. Badania gotowych obiektów: a) ram rowerowych, b) ram motorowerowych

Badania ciężkich ram spawanych

Badania ram podwozi pojazdów, przyczep oraz wózków pojazdów szynowych są bardzo ważnymi badaniami w całym procesie projektowokonstrukcyjnym oraz certyfikacji pojazdu szynowego. Badania te kończą proces projektowo-konstrukcyjny tego obiektu. Celem badań ram jest określenie poprawności wykonania konstrukcji ramy jako jednego z najważniejszych elementów pojazdu decydującym o jego bezpieczeństwie. Są to elementy, które wymagają specjalistycznych stanowisk wraz z systemem obciążenia (Rys. 57).



Rys. 57. Rama przyczepy rolniczej: a) schemat obciążenia, b) widok stanowiska

Podobnie jak ramy przyczep rolniczych elementem pojazdu mającym bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo osób korzystających z transportu szynowego jest rama wózka pojazdu szynowego. Z tego względu badania ram wózków są niezbędnym etapem w procesie uzyskania Świadectwa Dopuszczenia do Eksploatacji i potwierdzenia spełnienia wymagań norm (EN-PN), kart UIC i innych. Producent nowego pojazdu (lub pojazdu modernizowanego) musi poddać jego elementy decydujące o bezpieczeństwie sprawdzeniu w niezależnej jednostce badawczej posiadającej odpowiednie uprawnienia do przeprowadzenia danego zakresu badań.

Dodatkowo celem badań kompletnych ram jest również optymalizacja masy pojazdu przy zachowaniu wysokiego poziomu bezpieczeństwa. Przykładowe badania obejmuja np. optymalizacje zawieszenia pojazdu pod katem komfortu pasażerów i zachowania odpowiedniej dynamiki, przekonstruowanie części czołowej pojazdu pod katem wytrzymałości na zderzenia, modyfikacje kształtu pudła, ramy wózka itp. Same badania dostarczają również producentowi informacji na temat jakości odwzorowania zaprojektowanej i wykonanej konstrukcji metodą elementów skończonych (MES). Badania obejmują analizę ramv wózka. zagadnienia pracy konstrukcii W procesie badań eksperymentalnych kompletnych ram można wyróżnić kilka podstawowych etapów, spośród których najważniejsze to:

- przygotowanie programu badań ramy (badania statyczne i zmęczeniowe),
- opracowanie projektu i wykonanie oprzyrządowania do badań, które ma na celu odwzorowanie obciążenia ramy w warunkach eksploatacji umożliwiając właściwe zamocowanie jej na stanowisku badawczym,
- analiza numeryczna stanu odkształceń ramy (MES) w celu identyfikacji obszarów o największej koncentracji naprężeń,

- opracowanie projektu i wykonanie instalacji tensometrycznej,
- badania statyczne i badania zmęczeniowe,
- analiza i ocena wyników badań.

Podstawą do opracowania programu obciążenia ramy wózka są najczęściej wyniki pomiarów eksploatacyjnych. Są one uzyskiwane podczas eksploatacji opomiarowanych pojazdów charakterystycznych dla tej klasy lub jego wybranych elementów nośnych na szlaku. Na Rys. 58 pokazano schemat pomiaru obciążeń eksploatacyjnych w ramie wózka pojazdu szynowego.



Rys. 58. Pomiar obciążeń eksploatacyjnych: a) 1 - analizowana struktura,
2 - rama wózka, 3 - czujniki pomiarowe, 4 - wzmacniacz pomiarowy, 5 - zasilanie, 6 - rejestrator wyników

W trakcie przejazdów rejestrowane są obciążenia oraz odkształcenia w strukturze ramy wózka. Rejestracja w wybranych obszarach ramy odbywa się zarówno podczas ustabilizowanej jazdy, jak również podczas wykonywania typowych manewrów, tj. hamowania, przyspieszania, jazdy po łuku, rozjazdach itp. Zarejestrowane obciążenia podlegają opracowaniu. Jego wynik to najczęściej widmo obciążenia, które może być podstawą przygotowania programu obciążenia, które jest następnie wykorzystywane podczas badań laboratoryjnych. Powyższe wyjaśniono na Rys. 20.

Obecnie stosowane w laboratoriach podczas badań certyfikujących programy obciążenia są efektem wielu lat doświadczeń zarówno producentów, jak i użytkowników pojazdów. Na Rys. 59 pokazano przykładowy rozkład najważniejszych sił możliwych do wystąpienia podczas eksploatacji na ramie wózka.

Przedstawiony rozkład powinien zostać odwzorowany na stanowisku badawczych. Wraz z rozwojem metod badawczych liczba kierunków obciążenia ramy ciągle wzrastała. Analiza procedur badawczych laboratoriów wykonujących badania ram wózków pojazdów szynowych wskazuje, że liczba osi obciążenia niezbędna do odwzorowania w laboratorium ulega ciągłemu zwiększeniu i obecnie wynosi już kilkanaście. Powoduje to, że koszty przygotowania badań, jak również ich prowadzenia ciągle rosną. Na Rys. 60 pokazano przygotowany na podstawie badań eksploatacyjnych przykładowy program obciążenia ramy wózka pojazdu szynowego.



Rys. 59. Schemat ramy przykładowego wózka wraz z oznaczeniami sił, reakcji i przemieszczeń; XYZ – globalny układ współrzędnych wg [111]



Rys. 60. Przykładowy program obciążenia ramy wózka pojazdu szynowego

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 (tramwaje). Obecnie na stanowisku można realizować badania dla ośmiu kierunków obciążenia. Ze względu na fakt wykorzystywania stanowiska podczas badań własnych na Rys. 61 pokazano widok tego stanowiska, natomiast na Rys. 62 jego schemat ideowy.



Rys. 61. Stanowisko do badań ram wózków tramwajowych powstałe na Uniwersytecie Technologiczno-Przyrodniczym

Stanowisko wyposażone zostało w hydrauliczne systemy generowania obciążeń, jak również sterowania i rejestracji uzyskanych wyników. Przyjęte w stanowisku rozwiązania konstrukcyjne pozwalają na prowadzenie badań typoszeregu ram wózków pojazdów szynowych produkowanych m.in. przez firmę PESA S.A. Podczas opracowywania projektu ramy zostały uwzględnione wymagania branżowe dotyczące procedur sprawdzania i badania nowych prototypów ram wózków pojazdów szynowych. W skład systemu hydraulicznego wchodzą między innymi:

- kompletny zasilacz hydrauliczny o wydajności 170 l/min i minimalnym ciśnieniu nominalnym 28 MPa, który umożliwia jednoczesną pracę pięciu siłowników hydraulicznych przy nominalnym obciążeniu od ±63 kN do ±250 kN przystosowanych do mocowania na dowolnej ramie wykonanej na potrzeby badań zmęczeniowych kompletnego zespołu,
- oprogramowanie badawcze, które umożliwia: dowolną konfigurację siłowników i czujników pomiarowych wg zadanego programu obciążenia,

realizację dowolnych przebiegów obciążenia pięcioma siłownikami jednocześnie lub każdym z siłowników niezależnie, a także odtwarzanie dowolnych zarejestrowanych przebiegów, sterowanie siłownikami w funkcji dowolnego mierzonego parametru, komunikację synchroniczną pomiędzy komputerowym układem sterowania, realizację badań z wykorzystaniem własnego oprogramowania przygotowanego wg indywidualnych potrzeb.

Wykonane stanowisko poddano ocenie podczas audytu, jaki przeprowadziło Polskie Centrum Akredytacji w dniu 22 września 2014 r. W wyniku oceny badania prowadzone na wykonanym stanowisku poszerzyły zakres akredytacji Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji (AB 372).



Rys. 62. Stanowisko do badań zmęczeniowych ram: 1) komputer rejestrujący wyniki badań, 2) komputer sterujący programem obciążenia, 3) komputer sterujący systemem hydraulicznym zadającym obciążenia, 4) wzmacniacz tensometryczny, 5) sieć kablowa łącząca tensometry ze wzmacniaczem tensometrycznym, 6) rama stanowiska badawczego, 7) serwocylinder pionowy, 8) serwocylinder poziomy, 9) badany obiekt, 10) zasilacz hydrauliczny, 11) układ chłodzenia, 12) rurociąg oleju hydraulicznego, 13) sieć kablowa układu obciążającego

2.5. KRYTYCZNA OCENA OBECNEGO STANU WIEDZY

2.5.1. Uwagi ogólne odnoszące się do zjawiska zmęczenia połączeń spawanych

- a) Zmęczenie jest procesem lokalnym, który swój początek ma w niewielkich obszarach koncentracji naprężeń. Z tego też względu w projektowanych obiektach technicznych konstruktorzy w miarę możliwości starają się unikać różnego rodzaju nieciągłości powstałych w wyniku ostrych przejść, gwałtownych zmian przekrojów, braku promieni itp. Niezwykle ważną sprawą jest rodzaj oraz jakość wykonywanych połączeń, w tym połączeń spawanych. Podczas badań doświadczalnych prowadzonych w wielu ośrodkach naukowych wielokrotnie potwierdzono, że wszelkiego rodzaju wady spoin, występujące nieciągłości mogą być źródłem inicjacji pęknięć. Bardzo ważna jest również jakość zabiegów technologicznych wykonywanych po procesie spawania np. obróbką skrawaniem czy nagniataniem ze względu na przeciwdziałanie zmęczeniowemu pękaniu.
- b) Elementy złożonych struktur spawanych są łączone za pomocą różnych rodzajów spoin (czołowe, pachwinowe, otworowe itp.). Proces spawania związany jest z lokalnym doprowadzeniem do łączonych materiałów znacznego strumienia energii cieplnej. Powoduje to powstawanie podczas spawania naprężeń spawalniczych. Poziom tych naprężeń zależy od bardzo wielu czynników. Do najbardziej istotnych należą parametry procesu spawania, złożoność konstrukcji spawanej czy technologia spawania. Naprężenia spawalnicze powodują podwyższenie naprężeń średnich oraz maksymalnych.
- c) 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.

2.5.2. Uwagi odnoszące się do poprawy trwałości połączeń spawanych

 a) Już niewielkie przeprężenie złożonej konstrukcji spawanej pozwala na uzyskanie efektu relaksacji naprężeń w obszarach ich spiętrzeń, jakimi są spoiny łączące elementy. Uzyskany efekt w postaci obniżenia poziomu naprężeń w obszarze spoiny po wstępnym przeciążeniu uwidacznia się w sposób szczególny w przypadku wyższych poziomów naprężeń
spawalniczych. W wyniku przeprężania następuje redystrybucja i częściowe usunięcie naprężeń spawalniczych (potwierdzone podczas badań). Ze względu na znaczne gabaryty wykonywanych obiektów metoda ta wymaga jednak zastosowania specjalnych układów do zadawania obciążeń oraz kontroli ich skutków w najbardziej wytężonych obszarach.

- b) W odpowiedzialnych konstrukcjach spawanych naprężenia spawalnicze powinny być w miarę możliwości usuwane lub minimalizowane. Jest to spowodowane faktem, że w warunkach obciążeń eksploatacyjnych naprężenia te sumują się z naprężeniami nominalnymi powodując w krańcowych przypadkach przekroczenie naprężeń przyjętych za dopuszczalne, co może doprowadzić do występowania pęknięć zmęczeniowych, które mogą doprowadzić do katastrof.
- c) Naprężenia spawalnicze mogą ulegać samoczynnej likwidacji w wyniku sezonowania. Jest to jednak proces długotrwały, który może trwać nawet kilka lat. Z tego też względu metodę tę należy traktować jako nieprzydatną. Klasycznym sposobem likwidacji problemu naprężeń resztkowych jest stosowanie wyżarzania odprężającego. Bez wątpienia słabą stroną tej metody jest duży koszt energii koniecznej do podgrzania znacznych nieraz objętości materiału. Wyżarzanie odprężające jest również związane z koniecznością usuwania zgorzeliny, występowaniem zmian fazowych w materiałach wrażliwych na temperaturę oraz zmianami właściwości mechanicznych materiału. Alternatywą wydaję się być odprężanie wibracyjne.
- d) Poprawę trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych uzyskać można poprzez różnego rodzaju zabiegi technologiczne pozwalające obniżyć poziom naprężeń w obszarach spoin. Do podstawowych zabiegów można zaliczyć: przetapianie połączeń w najbardziej newralgicznych obszarach węzłów spawanych, obróbkę mechaniczną, kulowanie, śrutowanie, igłowanie itp. Wymienione zabiegi, podobnie jak wyżarzanie odprężające, należą do bardzo kosztochłonnych.

2.5.3. Uwagi odnoszące się do projektowania struktur spawanych

a) 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.

- b) 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 osiąganie nieograniczonej trwałości, a jedynie zapewnienie odpowiedniej trwałości.
- c) 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.
- d) Bardzo czesto 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 sa w tym celu mniej lub bardziej złożone systemy badawcze, jednak w przypadku struktur nośnych środków transportu sa to najczęściej wieloosiowe stanowiska do zadawania zmiennych w czasie odpowiadających obciążeń przyjętym W procesie projektowym wymuszeniom.
- e) 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.

- f) Proces projektowo-konstrukcyjny złożonych obiektów technicznych jest bardzo kosztochłonny, na co składają się głównie wysokie koszty przygotowania obiektów badań do testów zmeczeniowych oraz wysokie koszty prób zmęczeniowych prowadzonych na wieloosiowych stanowiskach badawczych (zlecanych 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 niepewnościa co powoduje, że bardzo czesto istnieje konieczność przeprowadzenia co najmniej kilku powtórzeń prób zmęczeniowych. W przypadku negatywnego wyniku badania gotowego obiektu niezbedne sa 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.
- g) 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.

2.6. METODA 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. 63 pokazano w sposób schematyczny przebieg postępowania w proponowanym podejściu do projektowania struktur spawanych.



Rys. 63. 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 wyznaczane 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 węźle rozpatrywanej struktury.

W wyniku przeprowadzonych testów zmęczeniowych prowadzonych w miarę możliwości na jednoosiowych maszynach (lub innych prostych stanowiskach badawczvch) określana iest trwałość zmeczeniowa w wytypowanych węzłach elementarnych i, jeśli zachodzi taka potrzeba, prowadzi się kolejne iteracje modelowanie - 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.

3. ANALIZY I BADANIA WŁASNE

Podstawą nowoczesnego projektowania złożonych obiektów, w tym spawanych, powinna być realizacja iteracyjnego procesu, w którym badania doświadczalne są przeplatane obliczeniami (np. numerycznymi). Może to pozwolić na zwiększenie prawdopodobieństwa pozytywnego wyniku badań gotowego obiektu technicznego, a tym samym znaczne ograniczenie bardzo drogich i długotrwałych badań doświadczalnych na rzecz badań węzłów konstrukcyjnych.

Dla potwierdzenia postawionej w pracy tezy niezbędna była weryfikacja doświadczalna przyjętych dla projektowanej ramy założeń konstrukcyjnych już w pierwszych etapach procesu projektowo-konstrukcyjnego. Konieczne jest przeprowadzenie badań doświadczalnych na prostych i jednocześnie znacznie tańszych obiektach w warunkach obciążeń odzwierciedlających warunki obciążenia gotowego obiektu. Obiekty badane to próbki materiałowe, proste połączenia i zespoły będące efektem dekompozycji złożonego obiektu technicznego. Cechować je powinno zróżnicowanie cech materiałowych, jak i geometrycznych. Podczas badań numerycznych, jak i doświadczalnych tych elementów powinny zostać uwzględnione parametry obciążenia występujące podczas badań laboratoryjnych oraz w warunkach eksploatacji gotowego obiektu. W programie badań własnych powinny zostać uwzględnione badania eksperymentalne zarówno próbek materiałowych, jak również połączeń spawanych o różnym stopniu skomplikowania. Wszystkie analizowane próbki wykonano ze stali S355J2+N.

3.1. CEL, PROGRAM I OPIS BADAŃ WŁASNYCH

Zasadniczym celem eksperymentalnych badań własnych była doświadczalna analiza trwałości zmęczeniowych uzyskanych na tych samych poziomach odkształcenia dla różnej postaci geometrycznej próbek i wezłów spawanych. Celem dodatkowym badań była doświadczalna analiza wpływu wybranych czynników na wyniki badań. Zakres badań własnych obejmował zarówno analizy numeryczne, jak i badania doświadczalne obiektów o różnej postaci geometrycznej. Analizie poddano wpływ różnych czynników związanych z procesem technologicznym na trwałość połączeń spawanych. Badania własne obejmowały realizację prób zmęczeniowych w warunkach obciążeń stałoamplitudowych i nieregularnych próbek wykonanych z jednego materiału stosowanego na ramę wózka pojazdu szynowego.

Program badawczy zakładał rozpoczęcie analiz teoretycznych od próbki o największym stopniu złożoności zgodnie z piramidą przedstawioną na Rys. 63, 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 Rys. 64.



Rys. 64. Plan badań

3.2. OBIEKT BADAŃ

Do badań przyjęto ramę wózka pojazdu szynowego (tramwaju). Rama wózka to podstawowy element podwozia pojazdu szynowego. Pozwala poruszać się pojazdowi szynowemu po torach. Na niej zamocowane jest nadwozie pojazdu szynowego. Zastosowane połączenie nadwozia z ramą wózka zapewnia podatność połączenia, możliwość obrotu oraz przesuwu ramy względem nadwozia. Rama wózka łączy w całość: zestawy kołowe, zespoły napędowe, zespoły hamulcowe, układy oparcia nadwozia i usprężynowania oraz wyposażenie dodatkowe zabudowane na wózku. Rama wózka przenosi obciążenie z nadwozia na zestawy kołowe pojazdu szynowego i decyduje o bezpieczeństwie jazdy i niezawodności całego pojazdu. Ze względów funkcjonalnych musi być wytrzymała na obciążenia statyczne i dynamiczne. Ponadto powinna być dostatecznie sztywna i ze zrozumiałych względów lekka. Jej kształt jest zależny od liczby zestawów kołowych, ich prowadzenia, typu układu przenoszenia sił pociągowych, sposobu usprężynowania, rodzaju zastosowanych układów napędowych i hamulcowych, prędkości pojazdu szynowego itp.

Ze względu na pełnione funkcje rozróżnia się wózki napędne, czyli te, których zestawy kołowe pełnią rolę napędową oraz wózki toczne, których zestawy kołowe pełnią tylko funkcję toczną. W pojazdach szynowych wózki klasyfikuje się również pod względem ilości zestawów kołowych w nich zabudowanych. W wózkach mogą maksymalnie występować cztery zestawy kołowe. Najczęściej spotykane to wózki dwuosiowe stosowane w pojazdach szynowych, lokomotywach elektrycznych i spalinowych, zespołach trakcyjnych, wagonach osobowych i towarowych itp. Mimo swojego zróżnicowania zależnego od stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych, ramy wózków mają pewne elementy wspólne. Są nimi dwie podłużnice, zwane też belkami ostojnicowymi - elementy ramy równoległe do osi toru - oraz poprzecznice, czyli belki poprzeczne do osi toru, stanowiące łączniki dla równolegle usytuowanych podłużnic (Rys. 65).



Rys. 65. Elementy ramy wózka: A - podłużnice, B - poprzecznice, C - czołownice

Jeżeli w ramie występują poprzecznice łączące końce podłużnic, to nazywa się je czołownicami. Ramy wózków wykonywane są jako:

- spawane blachownicowe,
- spawane z pasów blach o grubościach 12-18 mm w formie belek skrzynkowych,
- spawane z pasów blach j.w. i elementów odlewanych,
- jako odlewy jednoczęściowe,
- jako odlewy wieloczęściowe.

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.

Projekty wózków wykonywane są w nowoczesnym oprogramowaniu komputerowym 3D w zakresie projektowania konstrukcji mechanicznej oraz wytrzymałościowych obliczeń numerycznych. Po wykonaniu projektu wykonywany jest prototyp. Odpowiednie, zgodne z projektem kształty elementów z blachy wycinane są przez maszyny CNC (np. wycinarki laserowe lub plazmowe). Pozwala to na uzyskanie bardzo dużej dokładności i jakości wykonania elementów. Wycięte elementy z blachy przekazuje się do dalszego procesu technologicznego, takiego jak gięcie na sterowanych numerycznie prasach krawędziowych, czy obróbki skrawaniem (frezowanie) w celu uzyskania kształtów zgodnych z geometrią przyszłej ramy wózka. W zakresie obróbki istotną częścią procesu jest ukosowanie krawędzi arkuszy blachy wszędzie tam, gdzie wymaga tego technologia spawalnicza z punktu widzenia spawania odpowiednimi spoinami. Komponenty składowe ram wózku, takie jak podłużnice czy poprzecznice są wykonywane niezależnie.

Do produkcji komponentów ramy, jak i całej ramy, musi zostać zaprojektowane specjalistyczne, dedykowane oprzyrządowanie, które pozwala na precyzyjne ułożenie elementów (blach) i ich połączenie (spawanie) z zachowaniem wymaganego kształtu i wymiarów geometrycznych. W wielu wytwórniach proces spawania ram jest częściowo lub w pełni zautomatyzowany i odbywa się z wykorzystaniem robotów spawających.

Po wykonaniu podłużnic i poprzecznic montuje się je odpowiednio w przyrządzie montażowym, w którym następuje zespawanie tych komponentów w całość uzyskując tym samym główną konstrukcję ramy wózka. Do tak wykonanej ramy wózka mocuje się (metodą spawania) dodatkowe elementy, rożnego rodzaju wsporniki i elementy montażowe umożliwiające zamontowanie wyposażenia danego wózka.

Na ramie wózka mogą być pozostawione odpowiednie naddatki technologiczne materiału. Jest to spowodowane tym, że w procesie spawania dochodzi do naturalnej pracy materiału stalowego na skutek wprowadzania ciepła z procesu spawania. W związku z tym konstruktorzy i technolodzy na etapie projektowania przewidują miejsca występowania skurczy czy odkształceń spawalniczych oraz określają tolerancje wymiarowe wykonania konstrukcji spawanej. Po procesie spawania rama przechodzi proces uwalniania naprężeń spawalniczych omówionych w rozdziale 2.2.5. W firmie PESA S.A. jest to realizowane metodą odprężania wibracyjnego [41–43]. Po tym etapie rama jest obrabiana na wielkogabarytowych frezarkach w celu uzyskania bardzo dokładnych wymiarów w miejscach naddatków. Są to strefy strategiczne z punktu widzenia pokaźniejszej eksploatacji ramy wózka w pojeździe szynowym. Obróbka może dotyczyć na przykład miejsc mocowania układów prowadzenia zestawów kołowych, usprężynowania, czy oparcia nadwozia itp.

Podczas kolejnych etapów produkcyjnych odbywa się szczegółowa kontrola jakości wykonania. Ostateczne pomiary kontrolne geometrii ramy są wykonywane po zakończeniu procesu spawania konstrukcji i obróbki mechanicznej. Jeżeli wyniki pomiarów są prawidłowe - zgodne z wytycznymi kart pomiarowych określonych przez konstruktora ramy - rama jest transportowana do lakierni, gdzie następuje oczyszczenie i odtłuszczenie konstrukcji stalowej przez zastosowanie obróbki strumieniowo-ściernej, zwanej potocznie śrutowaniem. Następnie rama przechodzi proces wykonywania powłok antykorozyjnych i lakierniczych.

Po lakierowaniu rama przekazana jest na stanowiska montażowe, na których następuje w niej montaż wyposażenia. Po jego zakończeniu gotowy wózek jest regulowany pod względem układów biegowych i usprężynowania i odbywa się końcowa kontrola jakości.

Kolejny etap to już montaż wózka pod pojazdem.

Prototypowe ramy muszą zgodnie z przepisami przejść bardzo złożone i pracochłonne badania wytrzymałościowe i zmęczeniowe. Badania te stanowią potwierdzenie prawidłowej metodologii wykonania obliczeń numerycznych zrealizowanych na etapie projektowania oraz potwierdzenie zastosowania zapewniajacych bezpieczeństwo rozwiazań w eksploatacii. Badania zmęczeniowe ramy wózka przeprowadzane są przez jednostki certyfikujące wyroby. Badanie polega na poddaniu ramy na specjalnym stanowisku obciążeniom zmiennym według wcześniej określonego programu, którego przykład podano na Rys. 60. Przyjmuje się, że realizowane obciążenia odpowiadają procesowi eksploatacji przez okres około 30 lat eksploatacji pojazdu szynowego. W trakcje badania, które może trwać kilkanaście tygodni, obserwuje się strukturę ramy pod względem ewentualnie pojawiających się zmian, mikropęknięć itd. Jeżeli test zakończy się pomyślnie, projekt ramy wózka i technologia jej wykonania zostają zatwierdzone do produkcji seryjnej - rama uzyskuje odpowiedni certyfikat. W przypadku nieprawidłowości konieczna jest modyfikacja projektu lub technologii wytwarzania i wyprodukowanie kolejnej ramy do badań. Bardzo czesto ze wzgledów ekonomicznych dokonuje sie naprawy uszkodzonej ramy i przeprowadza niezbędne modyfikacje i dalej prowadzi jej badanie. Z oczywistych względów przebadana rama nie może być zastosowana w pojeździe.

3.3. ANALIZY I DEKOMPOZYCJA *PRODUKTU*

Przeprowadzone analizy miały na celu dokonanie podziału *Produktu* (Rys. 66) w taki sposób, aby wyznaczyć reprezentatywne podzespoły o coraz niższym stopniu złożoności aż do uzyskania obiektów, dla których można w prosty sposób przeprowadzić analizy wytrzymałościowe. Bardzo ważnym aspektem było również to, aby sposób dekompozycji umożliwiał implementowanie wyników uzyskanych na próbkach niższego rzędu na obiektach wyższego rzędu złożoności. Na Rys. 66 przedstawiono obiekt wyjściowy, który poddano dekompozycji. W celu dekompozycji produktu na elementy niższego rzędu wykorzystano założenia konstrukcyjne występujące w procesie konstrukcyjnym *Produktu*. Danymi tymi były projektowe wartości obciążeń eksploatacyjnych oraz wymagana trwałość eksploatacyjna *Produktu*.





Na Rys. 67 przedstawiono model *Produktu* pozbawionego agregatów, na którym przedstawiono punkty, do których są przykładane główne obciążenia. Program badawczy pozwalający na implementacje obciążeń, jakim zostaje podanych produkt w trakcie całego swojego okresu eksploatacji, został opracowany i udostępniony przez producenta wózków pojazdów szynowych.

Wartości sił odpowiadających poszczególnym przypadkom obciążenia zamieszczono w Tab. 3 wraz z ich zwrotem opisanym w Tab. 4. Omawiany program obciążenia jest programem badawczym wyznaczonym z danych zebranych na torze rzeczywistym w trakcie eksploatacji pojazdu szynowego.

Znajomość wartości sił obciążających produkt w trakcie eksploatacji pozwoliły na jego dekompozycje do niższego poziomu nazwanego (Rys. 68).

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

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

			Fz2	Fy	Fx		
C	Obciążenia	Zwrot funkcji obciążenia					
Poziom obciążenia	Blok 1- Zwrotnica + łuki	W fazie	W fazie	W fazie	W fazie		
1 do 8 mln cykli	Blok 2 - Nabieganie + prosty tor	W fazie	W fazie	W fazie	W fazie		
Poziom obciążenia	Blok 1- Zwrotnica + łuki	W fazie	W fazie	W fazie	W fazie		
8 do 10 mln cykli	Blok 2 - Nabieganie + prosty tor	W fazie	W fazie	W przeciw fazie	W fazie		

Tab. 4.Zwrot przebiegu funkcji programu obciążającego dla poszczególnych osi
badawczych



b)

c)

a)



Rys. 67. Schemat punktów wypadkowych skupiających siły obciążające *Produkt*: a) widok z góry, b) widok z boku, c) widok z przodu



Rys. 68. Dekompozycja obiektu badawczego - Zespół

Znajomość obciążeń eksploatacyjnych, jak również cech geometrycznych złożonej struktury spawanej pozwoliła na przeprowadzenie analizy numerycznej *Produktu*. Przeprowadzono ją w środowisku do obliczeń metodą elementów skończonych ABAQUS 6.6-4. Przyjęto liniowo-sprężysty model materiałowy. Do badań wykorzystano model bryłowy ramy wózka tramwajowego (Rys. 69). Analizowany obiekt składał się z 340 elementów prostych (blach i innych części, w tym tulei gumowych w przegubach). Obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone w oparciu o własności wytrzymałościowe wyznaczone na podstawie przeprowadzonych wstępnie badań doświadczalnych na próbkach najniższego rzędu, jakimi są próbki materiałowe.



Rys. 69. Model konstrukcyjny Zespołu

Przeprowadzone analizy numeryczne obejmowały różne sekwencje obciążenia zgodnie z Tab. 3 i Tab. 4. Szczegółowa analiza wyników symulacji wykazała, że w ramie wózka występuje kilka obszarów spiętrzenia naprężeń (Rys. 70).

Zgodnie z oczekiwaniami największe wartości naprężeń w ramie uzyskano dla programu obciążenia odwzorowującego przejazd przez zwrotnice.



Rys. 70. Rozkład naprężeń zredukowanych w ramie wózka w warunkach statycznych na skutek działania obciążenia: a) Blok 1, b) Blok 2

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych opracowane zostały obiekty badań będące efektem dekompozycji *Produktu*. Na Rys. 71 przedstawiono wydzielony fragment struktury spawanej niższego rzędu składający się ze znacznie ograniczonej ilości elementów i zawierający do kilku węzłów spawanych, które są potencjalnymi źródłami pęknięć. W ramach analizy przeprowadzono dekompozycję ramy wózka na proste węzły, których obciążenie pozwoli odwzorować stan naprężenia w kompletnej ramie.



Rys. 71. Dekompozycja obiektu badawczego - Podzespół

Ważnym założeniem przy dekompozycji opartej o analizy MES jest takie dobranie cech konstrukcyjnych *Podzespołu* i próbek niższego rzędu, aby mogły one być możliwie wiele razy powielane w *Zespole* wyższego rzędu. Ponadto każdy *Podzespół* niższego rzędu musi być tak opracowywany, aby możliwe było odwzorowanie na nim programu badawczego dla *Zespołu* z wyższego rzędu.

Dekompozycje i wybór *Podzespołu* przeprowadzono w oparciu o następujące warunki brzegowe:

- stanowisko do badań węzła ramy umożliwia realizację takich samych obciążeń jak w całej ramie wózka pojazdu szynowego,
- są cztery miejsca utwierdzenia (podpory) ramy wózka,
- wszystkie obciążenia mają być realizowane za pomocą jednego siłownika (wykorzystanie jednej osi wieloosiowego systemu do badań zmęczeniowych),
- węzeł konstrukcyjny musi zawierać w swej budowie miejsca będące krytycznymi punktami,
- węzeł musi być fragmentem reprezentatywnym dla całej konstrukcji,
- uzyskane wyniki muszą być łatwe do transponowania na pozostałe części ramy, na przykład w oparciu o symetrie konstrukcji.

Na Rys. 72 przedstawiono złożony węzeł konstrukcyjny (*Podzespół*), który został wyznaczony jako węzeł badawczy. Zostały na nim odwzorowane naprężenia wywołane obciążeniem układu sił F_z.



Rys. 72. Modelowy węzeł badawczego ramy wózka

Na węzeł działają siły, które wywołają stan obciążenia zbliżony do obciążenia występującego w kompletnej ramie wózka zgodnie z Tab. 3 i Tab. 4. Przedstawiony schematycznie modelowy węzeł ramy wózka poddano analizie numerycznej. Wybrane wyniki analizy numerycznej modelowego węzła przedstawiono na Rys. 73.



Rys. 73. Wybrane wyniki numerycznej analizy modelowego węzła (Podzespołu)

Na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych opracowano programy badań wraz z wartościami siły obciążającej wykorzystanej w laboratoryjnych badaniach węzła. Na Rys. 74 przedstawiono metodykę wykorzystaną do wyznaczenia jednego wektora siły obciążającej badany węzeł. Przekształcenie układu obciążającego do jednego wektora siły pozwala w znaczący sposób uprościć proces badań własnych na analizowanym poziomie dekompozycji. W Tab. 5 przedstawiono wyznaczone wartości siły obciążającej badany obiekt.

Nr	Siła	a wypadko	Przesuniecie mocowania siłownika w mm			
ыоки	R_m	R_{amp}	R _{max}	R _{min}	Х	У
		Po	8·10 ⁶ cyk	li		
Blok 1	97,6	11,6	109,3	106	242	129
Blok 2	910,6	11,5	110,1	107,1	1910	17
		Po	oziom 2 - 2	2·10 ⁶ cyk	li	
Blok 1	102,7	19,9	122,7	102,10	1101	43
Blok 2	1010,4	110,6	127	109,10	154	3210

Tab. 5. Program obciążania cyklicznego węzła spawanego



Rys. 74. Schemat sposobu wyznaczenia siły R obciążającej węzeł konstrukcyjny

Na Rys. 75 przedstawiono schemat stanowiska badawczego do badań modelowego węzła.



Rys. 75. Stanowisko do badań modelowego węzła: a) widok ogólny, b) widok boczny na układ zamocowanego węzła i siłowników

Przedostatnim etapem dekompozycji *Produktu* było wydzielenie *Elementów* (Rys. 76) z *Podzespołu*. Celem tego etapu dekompozycji było pozyskanie obiektów badawczych posiadających maksymalnie jeden charakterystyczny węzeł spawany mogący być miejscem inicjacji pęknięcia zmęczeniowego. Węzłem tym mógłby być również węzeł nietypowy, w którym stan odkształceń podczas eksploatacji będzie bardzo trudny do przewidzenia.



Rys. 76. Dekompozycja obiektu badawczego - Element

Ostatnim stopniem dekompozycji są *Próbki* (Rys. 77) wykonane z materiałów podstawowych, z których jest wykonywana cała spawana konstrukcja (*Produkt*). Badania na tym poziomie pozwalają na określenie właściwości materiałowych próbek o różnej geometrii (grubość, kształt), różnej technologii obróbki, technologii przygotowania itp.



Rys. 77. Dekompozycja obiektu badawczego - Próbki

Przedstawione w pracy wyniki analizy numerycznej nie są celem głównym pracy. Stanowią jednak podstawową częścią analizowanego procesu projektowego złożonego węzła i są niezbędne do zrealizowania prawidłowego procesu dekompozycji produktu na podzespoły o obniżonych stopniach złożoności. Z tego powodu przebieg, jak i wyniki analiz numerycznych są w pracy przedstawione w sposób ogólnikowy.

3.4. BADANIA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH I CHEMICZNYCH

Celem badań było wyznaczenie podstawowych właściwości materiałowych, technologicznych, jak również strukturalnych. Ze względu na wykorzystywanie niektórych z wyznaczonych parametrów podczas obliczeń numerycznych ich znajomość była kluczowa z punktu widzenia realizowanej rozprawy. W ramach pracy przeprowadzono badania takie jak:

- badanie udarności,
- 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 węźle 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.

3.4.1. Badanie udarności

Badania przeprowadzono zgodnie z instrukcją badań Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji "Próba udarności stali w temperaturze otoczenia". Opracowana instrukcja jest zgodna z normą PN EN 148-1:2010. Do badań przygotowano 10 próbek typu U oznaczonych literami "Pr" (co oznacza kierunek pobrania próbek prostopadły do kierunku walcowania blachy) oraz 10 próbek typu U oznaczonych literami "Row" (co oznacza kierunek pobrania próbek równoległy do kierunku walcowania blachy). Oznaczenie wymiarów oraz kształt próbek przygotowanych do badań przedstawiono na Rys. 78. Natomiast na Rys. 79 zaprezentowano widok jednej z próbek, jak również szczegół karbu w kształcie U wykonanego na próbce. Wyniki identyfikacji podstawowych cech geometrycznych próbek "Pr" zestawiono w Tab. 6, natomiast próbek "Row" zestawiono w Tab. 7.



Rys. 78. Oznaczenia wymiarów próbek z karbem U



Rys. 79. Próbka przed badaniem a) widok próbki, b) widok karbu, 3 - oznaczenie promienia karbu

	2	W	h	1	4	3	5
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
Pr_1	5,08	10,02	10,03	55,03	28,32	0,973	
Pr_2	4,88	9,91	10,03	54,92	27,84	1,005	
Pr_3	4,94	9,97	10,04	55,05	26,79	1,007	
Pr_4	5,00	10,02	10,13	55,01	26,56	0,995	
Pr_5	4,96	10,02	10,02	55,04	26,58	1,07	000
Pr_6	5,01	10,02	10,05	55,02	28,25	1,001	90
Pr_7	4,95	10,01	9,98	55,02	26,59	0,995	
Pr_8	4,95	9,96	10,00	54,97	27,19	0,984	
Pr_9	4,92	10,06	10,02	55,01	25,62	1,012	
Pr_10	4,88	10,04	10,01	55,03	27,35	1,09	
Średnia	4,96	10,00	10,03	55,01	27,11	1,01	90°
Odchylenie standardowe	0,06	0,04	0,04	0,04	0,85	0,04	0°
Mediana	4,95	10,02	10,03	55,02	26,99	1,00	90°

Tab. 6.Wyniki pomiarów dla próbek "Pr" pobranych prostopadle do kierunku
walcowania

Tab. 7. Wyniki pomiarów dla próbek "Row" pobranych równolegle do kierunku walcowania

	2	W	h	1	4	3	5
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
Row_1	4,91	10,02	10,02	55,80	28,38	1,004	
Row_2	4,93	10,02	10,03	55,07	26,75	0,972	
Row_3	4,96	10,02	10,02	55,04	27,29	1,02	
Row_4	4,93	10,02	10,02	55,03	26,70	0,995	
Row_5	4,91	10,03	10,03	55,03	28,32	0,986	000
Row_6	4,94	10,01	10,03	53,03	26,70	0,992	90*
Row_7	4,93	10,03	10,02	55,03	28,36	0,989	
Row_8	4,95	10,03	10,03	55,05	28,32	1,09	
Row_9	4,92	10,01	10,04	55,06	26,64	1,015	
Row_10	4,93	10,01	10,02	55,04	28,36	0,982	
Średnia	4,93	10,02	10,03	54,92	27,58	1,00	90°
Odchylenie standardowe	0,02	0,01	0,01	0,70	0,83	0,03	0°
Mediana	4,93	10,02	10,03	55,04	27,81	0,99	90°

Wyznaczone odchylenie standardowe istotnych wymiarów geometrycznych (2, w, h, 1, 4, 3) na poziomie 0,04 mm świadczy o znaczącej powtarzalności wymiarów (Tab. 6 i Tab. 7). Wpływa to korzystnie na jakość realizowanych badań tam, gdzie geometria próbki ma istotne znaczenie.

Badania udarności przeprowadzono na młocie wahadłowym RPK 450 o zakresie pomiarowym do 300 J. Przeprowadzono po 10 prób dla określenia udarności każdej serii próbek. Na podstawie uzyskanych wyników określono wartości średnie. Badanie przeprowadzono na urządzeniu z zautomatyzowanym odczytem energii łamania.

3.4.2. Badania i składu chemicznego

Badania składu chemicznego przeprowadzono zgodnie z normą PN-H-04045:1997 "Badania składu chemicznego stali metodą spektrometrii emisyjnej". Próbki do badań pobrano z blach stosowanych na spawaną ramę. Przed badaniem z próbek usunięto warstwę tlenków i przygotowano powierzchnię warstwy wierzchniej zgodne z zaleceniami zawartymi w normie. Zakres badań obejmował określenie składu chemicznego 6 próbek stalowych pobranych z blach o grubości 10 mm oraz z próbek węzłów spawanych o grubości 10 mm.

Badanie składu chemicznego zostało przeprowadzone na jednej powierzchni każdej próbki. Miejsca kolejnych badań były przesunięte względem siebie o wielkość rozmiaru krateru wykonanego przez palnik plazmowy. Badania składu chemicznego próbek przeprowadzono na spektrometrze emisyjnym Foundry-MASTER. Przeprowadzono po pięć prób określenia składu chemicznego dla każdego z obiektów. Na podstawie uzyskanych wyników określono wartości średnie zawartości pierwiastków w stali. Zakres pomiarowy dla poszczególnych pierwiastków wynosił odpowiednio $C(0,01\div1,50)$ %; Mn(0,01÷1,8)%; Si(0,01÷2)%; P(0,01÷0,05)%; S(0,01÷0,05)%; Cr(0,01÷3)%; Ni(0,01÷4,5)%; Cu(0,01÷0,5)%; Mo(0,01÷0,5)%; V(0,01÷0,6)%; Al(0,01÷0,2)%; Nb(0,01÷0,1)%.

3.4.3. Badania wytrzymałości na rozciąganie próbek gładkich

Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2010 "Metale. Próba rozciągania-Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej Metoda B". Do badań przygotowano 6 serii próbek. Widok przykładowej próbki przedstawiono na Rys. 80. Próbki przygotowano zgodnie z przywołaną wyżej normą. Próbki pobierano z blach o grubości 12, 14 i 16 mm zgodnie z kierunkiem walcowania i równolegle do niego.

Przygotowane próbki były podzielone na dwie partie w zależności od kierunku walcowania:

- a) seria P próbki wycięte z arkusza w kierunku poprzecznym do kierunku walcowania,
- b) seria W próbki wycięte z arkusza w kierunku równoległym do kierunku walcowania,

Położenie miejsc pobierania próbek do badań na arkuszu blachy przedstawiono na Rys. 81.



Rys. 80. Próbka do badań wytrzymałości na rozciąganie: a) widok, b) geometria próbki



Rys. 81. Położenie próbek na arkuszu blachy

Badania polegały na poddawaniu próbki obciążeniu monotonicznie narastającemu z prędkością przesuwu tłoka maszyny wynoszącą 0,05 mm/s. Na Rys. 82 przedstawiono widok próbki zamocowanej w uchwytach maszyny wytrzymałościowej.

Wydłużenie próbki mierzono przy wykorzystaniu ekstensometru o zakresie pomiarowym 50 mm mocowanego na próbce (Rys. 82). Początkowa długość pomiarowa wynosiła 70 mm. Badania przeprowadzono w temperaturze 21 °C. Próby prowadzono do chwili trwałego rozdzielenia próbki w obszarze części pomiarowej. W trakcie próby statycznego rozciągania rejestrowano chwilowe wartości siły obciążającej próbkę oraz jej wydłużenie.



Rys. 82. Próbka zamocowana na stanowisku badawczym

3.4.4. Badania niskocyklowe próbek gładkich

Badania przeprowadzono zgodnie z wytycznymi określonymi w normie PN-74 H-04327 "Próba osiowego rozciągania i ściskania przy stałym cyklu obciążenia zewnętrznego". Do badań przygotowano 20 próbek. Próbki wykonano zgodnie z normą PN-84/H-04334. Kształt i wymiary próbki do badań przedstawiono na Rys. 83.



Rys. 83. Próbki do badań niskocyklowych; a) geometria próbki, b) widok próbki

Przed badaniami próbki poddano identyfikacji wymiarów części pomiarowej. Jej wyniki zestawiono w Tab. 8.

					Wymiar	y próbki	i		
L.p.	Oznaczenie	B_1	B_2	B ₃	$\mathbf{B}_{\mathrm{\acute{s}r}}$	H_1	H_2	H ₃	H _{śr}
	prodki				m	m			
1	P01	16.24	16.20	16.21	16.22	11.76	11.76	11.77	11.76
2	P02	16.07	16.07	16.08	16.07	11.74	11.75	11.75	11.75
3	P03	16.04	16.03	16.05	16.04	11.64	11.64	11.64	11.64
4	P04	16.14	16.08	16.13	16.12	11.75	11.75	11.75	11.75
5	P05	16.00	15.99	16.00	16.00	11.59	11.60	11.64	11.61
6	P06	16.04	16.03	16.02	16.03	11.69	11.70	11.71	11.70
7	P07	15.81	15.80	15.82	15.81	11.81	11.81	11.80	11.81
8	P08	15.89	15.88	15.89	15.89	11.72	11.71	11.71	11.71
9	P09	16.06	16.05	16.04	16.05	11.76	11.76	11.77	11.76
10	P10	15.93	15.93	15.94	15.93	11.80	11.80	11.80	11.80
11	P11	16.31	16.30	16.30	16.30	11.69	11.70	11.71	11.70
12	P12	16.31	16.31	16.31	16.31	11.77	11.76	11.76	11.76
13	P13	16.05	16.04	16.05	16.05	11.73	11.74	11.74	11.74
14	P14	15.74	15.73	15.74	15.74	11.70	11.69	11.67	11.69
15	P15	15.71	15.71	15.73	15.72	11.73	11.72	11.72	11.72
16	P16	15.75	15.74	15.75	15.75	11.75	11.76	11.77	11.76
17	P17	16.19	16.17	16.18	16.18	11.81	11.81	11.82	11.81
18	P18	16.12	16.13	16.14	16.13	11.86	11.87	11.86	11.86
19	P19	15.81	15.77	15.76	15.78	11.82	11.82	11.82	11.82
20	P20	15.80	15.81	15.83	15.81	11.77	11.77	11.78	11.77

Tab. 8. Identyfikacja próbek do badań zmęczeniowych

Niskocyklowe badania zmęczeniowe polegały na poddawaniu próbki obciążeniu zmiennemu do chwili powstania pęknięcia zmęczeniowego. Podczas badań odkształcenia próbki mierzono przy wykorzystaniu ekstensometru o bazie 10 mm i zakresie pomiarowym ±1mm mocowanego na części pomiarowej próbki. Badania przeprowadzono w temperaturze 21°C. Częstotliwość obciążenia *f* wynosiła podczas badań 0,2 Hz. Jako kryterium końca próby zmęczeniowej przyjęto pojawienie się widocznego nieuzbrojonym okiem pęknięcia próbki. Podczas badań rejestrowano dla wybranych cykli obciążenia wartości chwilowe siły obciążającej oraz odkształcenia próbki. Przyjęta podczas badań częstość próbkowania sygnału siły i odkształcenia pozwalała opisywać rejestrowane cykle obciążenia 200 punktami. Niskocyklowe badania zmęczeniowe przeprowadzono na 8 poziomach amplitudy odkształcenia całkowitego ε_{ac} dla współczynnika asymetrii cyklu R = -1 ($R = \varepsilon_{min}/\varepsilon_{max}$). Badania prowadzono w warunkach kontrolowanego odkształcenia całkowitego ε_{ac} =const. Na Rys. 84 przedstawiono położenie wybranych poziomów odkształcenia ε_{ac} na tle przykładowego wykresu statycznego rozciągania. Zauważyć należy, że po przekroczeniu granicy plastyczności poziomy badania niskocyklowego są do siebie zbliżone, a w miarę zwiększania odkształcenia dobierane poziomy badania są coraz bardziej oddalone od siebie aż do poziomu wynoszącego 2%. Zabieg ten miał na celu zwiększenie dokładności uzyskanych wyników w obszarze przejścia pomiędzy dominującymi odkształceniami sprężystymi a plastycznymi. Ponadto pozwoliło to na ograniczenie ilości badań na poziomach, gdzie badanie mogło się zakończyć po zrealizowaniu kilkudziesięciu cykli obciążenia. Zestawienie parametrów prób zmęczeniowych przedstawiono w Tab. 9.



Rys. 84. Poziomy badania niskocyklowego na tle wykresu statycznego rozciągania

Przebieg obciążenia	Nazwa programu	Parametry obciążenia
	Obciążenie stałoamplitudowe f = 0,2 Hz, rejestracja wybranych cykli	$arepsilon_{ac1}=0,25\%$ $arepsilon_{ac2}=0,3\%$ $arepsilon_{ac3}=0,5\%$ $arepsilon_{ac4}=0,8\%$ $arepsilon_{ac5}=1,0\%$ $arepsilon_{ac6}=1,2\%$ $arepsilon_{ac7}=1,6\%$ $arepsilon_{ac8}=2\%$

Tab. 9. Parametry programów obciążenia

Na Rys. 85 przedstawiono widok próbki (wraz z ekstensometrem) zamocowanej w uchwytach maszyny wytrzymałościowej przed rozpoczęciem badań.



Rys. 85. Próbka zamocowana w uchwytach maszyny wytrzymałościowej

3.4.5. Badanie jakości złącz spawanych

Badania nieniszczące złączy spawanych przeprowadzono zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie PN-EN ISO 5817 "Spawanie - Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką). Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych". Obiektami badań były złącza spawane struktury ramy wózka wykonane zgodnie z technologią stosowaną w procesie produkcyjnym. Badanie przeprowadzono na złączach doczołowych próbek płaskich, jak i na elementach konstrukcyjnych ramy wózka tramwajowego.

3.4.6. Badania wytrzymałości na rozciąganie mikropróbek pobranych ze spoiny doczołowej

Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2010 "Metale. Próba rozciągania-Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej Metoda B". Obiektem badań było złącze spawane struktury ramy wózka wykonane zgodnie z technologią stosowaną w procesie produkcyjnym. Podczas badań stosowano mikropróbki pobrane z trzech stref złącza: spoiny, strefy wpływu ciepła i materiału rodzimego. Na Rys. 86 przedstawiono kształt i podstawowe wymiary wykonanych mikropróbek.



Rys. 86. Kształt i wymiary mikropróbek

Próbki wycinano z warstwy blachy o grubości 0,4÷0,5 mm oraz 0,8÷1,0 mm pobranej ze złącza spawanego metodą EDM (Electrical Discharge Machining) (Rys. 87a). Następnie po ich oczyszczeniu, szlifowaniu i obróbce drobnoziarnistym papierem ściernym wycinano z nich metodą obróbki laserowej próbki z poszczególnych warstw i stref złącza (Rys. 88b). W celu wyeliminowania wpływu ciepła wydzielającego się podczas obróbki jedną próbkę wycinano stosując wielokrotne przejście wiązki lasera. Jedną próbkę obrabiano stosując około 50 000 przejść wiązki lasera. Na Rys. 87 przedstawiono miejsca pobierania próbek ze złącza spawanego.



Rys. 87. Usytuowanie próbek na spoinie, SWC i materiale rodzimym: a) schemat, b) widok zgładu

Na Rys. 88 przedstawia widok stanowiska do wykonywania próbek.



Rys. 88. Wycinanie mikropróbek laserem Nd:Yag

Dla zilustrowania wielkości wykonanych próbek na Rys. 89 przedstawiono zdjęcie przykładowych próbek po ich wycięciu z pojedynczej warstwy.



Rys. 89. Widok wyciętych mikropróbek w odniesieniu do monety

Badania prowadzono z zastosowaniem systemu do badań statycznych i zmęczeniowych mikropróbek i mikroobiektów MFS pokazanego na Rys. 90.



Rys. 90. System do badań statycznych i zmęczeniowych własności mikropróbek i mikroobiektów MFS

W trakcie badań wyznaczano przebieg zmian wartości siły rozciągającej w funkcji przemieszczenia. Podczas testów zadawano obciążenie z prędkością przesuwu trawersy wynoszącą 0,01 mm/s jednocześnie dokonywano pomiaru siły i odkształcenia części pomiarowej próbki metodą cyfrowej korelacji obrazu. Próbkę mocowano w elektromechanicznych uchwytach maszyny. Na Rys. 91 przedstawiono przykładową próbkę zamocowaną w uchwytach przed i w trakcie badania.



Rys. 91. Próbka w przestrzeni roboczej maszyny MFS: a) przed zaciśnięciem,b) po zaciśnięciu uchwytów

3.4.7. Badania wytrzymałości na rozciąganie próbek spawanych

Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2010 "Metale. Próba rozciągania-Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej Metoda B". Do badań przygotowano 4 próbki. Wykonano je zgodnie z normą PN-EN 10002-1: 2004. Badane próbki były przygotowane do spawania w sposób przedstawiony na Rys. 92. Proces spawania przeprowadzono zgodnie z technologią stosowaną podczas łączenia blach w trakcie produkcji ram.



Rys. 92. Ukształtowanie krawędzi typu V

Próbki zostały pobrane z połączeń spawanych blach o wymiarach 600 na 600 mm. Próbki pobierano z dwóch blach: pierwsza blacha była utwierdzona podczas spawania (próbki oznaczano jako SA), druga blacha była uwolniona podczas spawania (próbki oznaczano jako SE). Z blach wycinano próbki przy użyciu strumienia wody. Usytuowanie próbek na blasze przedstawiono na Rys. 93.



Rys. 93. Usytuowanie próbek względem spoiny

Kształt i wymiary próbek do badań statycznych przedstawiono na Rys. 94a, natomiast próbkę do badań zmęczeniowych przedstawiono na Rys. 94b.

Przed przystąpieniem do badań próbki poddano identyfikacji wymiarów części pomiarowej. Wyniki pomiarów zestawiono w Tab. 10.



Rys. 94. Kształt i wymiary próbek wykorzystywanych podczas prób statycznych: a) wymiary próbki, b) widok próbki

	Ozn.		Wymiary próbki mm						
Lp.	próbki	B_1	B_2	B ₃	$\mathbf{B}_{\mathrm{\acute{s}r}}$	H_1	H_2	H ₃	$H_{\mathrm{\acute{s}r}}$
1	SA01	12,51	12,5	12,5	12,50	9,99	10	10,01	10,00
2	SA02	12,51	12,51	12,51	12,51	10,07	10,06	10,06	10,06
3	SE01	11,94	11,93	11,94	11,94	10	9,99	9,97	9,99
4	SE02	11,91	11,91	11,93	11,92	10,03	10,02	10,02	10,02

Tab. 10. Wymiary próbek spawanych

Badania polegały na poddawaniu próbki monotonicznemu rozciąganiu z prędkością przesuwu tłoka maszyny wynoszącą 0,03 mm/s. Odkształcenie próbki mierzono przy wykorzystaniu dwóch ekstensometrów o bazie 10 mm i zakresie pomiarowym 50% oraz 10% mocowanego na próbce (Rys. 95). Na Rys. 96 przedstawiono szczegółowo miejsca zamocowania ekstensometrów.

Ekstensometr 1 obejmował spoinę, a ekstensometr 2 obejmował SWC i materiał rodzimy w części pomiarowej próbki. Badania przeprowadzono w temperaturze 21 °C. Próby prowadzono do chwili trwałego rozdzielenia próbki w obszarze części pomiarowej. W trakcie próby statycznego rozciągania rejestrowano chwilowe wartości siły obciążającej próbkę oraz jej wydłużenie.

Próbki w trakcie zaciskania w uchwytach maszyny wytrzymałościowej ulegały prostowaniu, które wprowadzało znaczące odkształcenie w części pomiarowej. Dotyczy to w szczególności próbek, które nie były utwierdzone podczas procesu spawania i uległy znaczącemu odkształceniu.



Rys. 95. Próbka zamocowana w uchwytach maszyny wytrzymałościowej



Rys. 96. Widok próbki z oznaczonym miejscem zamocowania ekstensometrów 1 i 2

3.4.8. Badania niskocyklowe próbek spawanych

Badania przeprowadzono w oparciu o normę PN-74 H-04327 "Próba osiowego rozciągania i ściskania przy stałym cyklu obciążenia zewnętrznego". Do badań przygotowano 12 próbek. Próbki wykonano zgodnie z normą PN-EN 10002-1: 2004 oraz normą PN-84/H-04334. Kształt i wymiary próbek do badań przedstawiono na Rys. 97. Proces spawania był zgodny z technologią spawania przedstawioną w Załączniku nr 1.

Przed procesem badań dostarczone próbki poddano identyfikacji wymiarów części pomiarowej. Wyniki pomiarów zestawiono w Tab. 11.

Niskocyklowe badania zmęczeniowe przeprowadzono na czterech poziomach amplitudy odkształcenia całkowitego ε_{ac} oraz współczynniku asymetrii R = -1 ($R = \varepsilon_{min}/\varepsilon_{max}$). Badania prowadzono w warunkach kontrolowanego odkształcenia całkowitego $\varepsilon_{ac} = \text{const.}$ Poziomy odkształcenia zmiennego przyjęto po analizie wykresu statycznego rozciągania i przedstawiono formie graficznej na Rys. 98. Zestawienie parametrów prób zmęczeniowych przedstawiono w Tab. 12.



Rys. 97. Próbki spawane do badań niskocyklowych; a) geometria próbki, b) widok próbki

	0	Wymiary próbki								
L.p.	Oznaczenie	B_1	B_2	B ₃	\mathbf{B}_{sr}	H_1	H_2	H ₃	H _{śr}	
	prodki				m	m				
1	SA21	12,51	12,5	12,50	12,50	9,99	10,00	10,01	10,00	
2	SA22	12,51	12,51	12,51	12,51	10,07	10,06	10,06	10,06	
3	SA23	12,25	12,24	12,25	12,25	10,03	10,04	10,04	10,04	
4	SA24	11,94	11,93	11,94	11,94	10,00	9,99	9,97	9,99	
5	SA25	11,91	11,91	11,93	11,92	10,03	10,02	10,02	10,02	
6	SA26	11,95	11,94	11,95	11,95	10,05	10,06	10,07	10,06	
7	SA27	12,39	12,37	12,38	12,38	10,11	10,11	10,12	10,11	
8	SA28	12,32	12,33	12,34	12,33	10,16	10,17	10,16	10,16	
9	SA29	12,01	11,97	11,96	11,98	10,12	10,12	10,12	10,12	
10	SA30	11,94	11,94	11,96	11,94	10,05	10,04	10,04	10,04	
11	SA31	11,98	11,97	11,98	11,97	10,07	10,08	10,09	10,08	
12	SA32	12,42	12,40	12,41	12,41	10,13	10,13	10,14	10,13	

Tab. 11. Identyfikacja próbek spawanych do badań zmęczeniowych

Niskocyklowe badania zmęczeniowe polegały na poddawaniu próbki obciążeniu zmiennemu do chwili powstania pęknięcia zmęczeniowego. Podczas badań mierzono odkształcenie próbki przy wykorzystaniu dwóch ekstensometrów o bazie 10 mm i zakresie pomiarowym ±1 mm mocowanych na części pomiarowej próbki. Ekstensometry umieszczone były na próbce zgodnie z Rys. 96. Ekstensometr 2 był ekstensometrem sterującym, a ekstensometr 1 był wykorzystywany do precyzyjnego określenia chwili wystąpienia pęknięcia. Badania przeprowadzono w temperaturze 21 °C. Częstotliwość obciążenia *f* wynosiła 0,2 Hz. Podczas badań rejestrowano dla wybranych cykli obciążenia wartości chwilowe siły obciążającej oraz odkształcenia próbki. Przyjęta podczas badań częstość próbkowania sygnału siły i odkształcenia pozwalała opisywać rejestrowane cykle obciążenia ok. 200 punktami na jeden cykl. Na Rys. 99 i Rys. 85 przedstawiono widok próbki (wraz z ekstensometrami) zamocowanej w uchwytach maszyny wytrzymałościowej.



Rys. 98. Poziomy badania niskocyklowego na tle wykresu statycznego rozciągania próbki spawanej

T 1	10	D /	,	1
Lab.	12.	Parametry	programow	obciazenia
		1 41 41110 41 5	programo	00014201114

Przebieg obciążenia	Nazwa programu	Parametry obciążenia	
	Obciążenie stałoamplitudowe <i>f</i> =0,2 Hz	$\mathcal{E}_{ac1}=0,1$ %, $\mathcal{E}_{ac2}=0,2$ %, $\mathcal{E}_{ac3}=0,3$ %, $\mathcal{E}_{ac4}=0,5$ %.	



Rys. 99. Próbka spawana zamocowana w uchwytach maszyny wytrzymałościowej w trakcie badań niskocyklowych

3.4.9. Badanie odkształceń pospawalniczych w węźle konstrukcyjnym oraz pomiar wpływu bliskości SWC na wytrzymałość blachy głównej w tym samym węźle

Badania przeprowadzono zgodnie z normami: ASTM W837-01 "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method 1", PN-EN ISO 6892-1:2010 "Metale. Próba rozciągania-Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej Metoda B", ISO 6507-1:2005 "Metallic materials - Vickers hardness test - Część 1.

Podczas badań wykorzystano próbki pobrane z węzła spawanego uzyskanego na podstawie dekompozycji struktury węzłów wyższego stopnia złożoności. Na Rys. 100 przedstawiono widok przykładowej ramy, w jakiej znajduje się kilkadziesiąt podobnych złożonych węzłów spawanych.

Na Rys. 101 przedstawiono węzeł ramy z którego pobrano próbki.

Podczas spawania węzła stosowano spoiny pachwinowe a10 wykonane w technologii spawania 135. Spoiny wykonywano czterema przejściami. Parametry spawania węzła były zgodne z technologią spawania konstrukcji "tram boogie". Maksymalna sumaryczna ilość wprowadzonego ciepła w jednej spoinie nie przekroczyła 40,5 kJ/mm.



Rys. 100. Rama nośna wózka pojazdu szynowego



Rys. 101. Spawany węzeł konstrukcyjny z oznaczonymi żebrami z)

Pomiaru naprężeń pospawalniczych dokonano na identycznych węzłach konstrukcyjnych, z czego tylko jeden z nich został podany wibroodprężaniu, a drugi nie. Ponadto jeden węzeł został przygotowanych do realizacji kolejnych badań i pobrania próbek wiosełkowych. Pobranie próbek wiosełkowych zostało przeprowadzone na węźle poddanym procesowi wibroodprężania.

Badania naprężeń pospawalniczych

Pomiaru dokonano metodą wierconego otworu zgodnie z wytycznymi zamieszczonymi w [112]. Umiejscowienie rozet tensometrycznych na badanym obiekcie pokazano na Rys. 103. W badaniu wykorzystano rozety tensometryczne Tenmex o bazie 3x17,10 i oporności 120 $\Omega \pm 0.2\%$. Średnica zastosowanego wiertła wynosiła 2,57 mm, a głębokość wiercenia 1 mm. Do określenia dokładnej wartości odkształceń pospawalniczych posłużono się modelem obliczeniowym dla rozety prostokątnej przedstawionym na Rys. 102. Umiejscowienie rozet tensometrycznych na jednej próbce przedstawiono na Rys. 103a.



Rys. 102. Schemat rozety prostokątnej

Odkształcenia i naprężenia wyznaczono na podstawnie równań przedstawionych poniżej:

$$\varepsilon_r = (A + B\cos 2\beta)\,\sigma_{max} + (A - B\cos 2\beta)\sigma_{min} \tag{17}$$

$$\beta = \frac{\arctan\left(\frac{-T}{-Q}\right)}{2} \qquad \sigma_{min} = P \pm \sqrt{Q^2} + T^2 \qquad (18)$$

Badania twardości SWC

Pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem twardościomierza uniwersalnego EMCO-TEST 969, stosując metodę Vickersa zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1:2007. Obciążenie zastosowane to HV10 (10 kG – 910 N). Pomiaru dokonano na polu poprzecznym części chwytowych próbek do badań monotonicznego rozciągania. Pomiaru twardości dokonano na pobranych próbkach wiosełkowych. Miejsca pomiaru twardości zostały przedstawione na Rys. 103a, oznaczono je symbolami gwiazdy "¹¹²".


Rys. 103. Próbki do badań: a) schemat usytuowania próbek i umiejscowienia trzech rozet tensometrycznych T1-2, b) wymiary próbki wioskowej

Badania wytrzymałości na rozciąganie

Próby rozciągania prowadzono na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8502 wyposażonej w siłomierz o zakresie 250 kN. Wydłużenie próbki mierzono przy wykorzystaniu ekstensometru o bazie 50 mm i zakresie pomiarowym 100% mocowanego na próbce. Badania przeprowadzono w temperaturze 22 °C. Jako kryterium końca próby przyjęto rozdzielenie próbki w obszarze części pomiarowej.

W trakcie próby statycznego rozciągania rejestrowano chwilowe wartości siły obciążającej próbkę oraz jej wydłużenie. Przyjęte warunki prób były zgodne z warunkami określonymi w normie [113]. Na Rys. 104 przedstawiono widok próbki przed i po badaniu. Położenie względem spoin próbek pobranych do próby statycznego rozciągania przedstawiono na Rys. 103b). Jako kryterium wyboru

obszaru, z którego zostały pobrane próbki do badań przyjęto odległość próbek od spoin pachwinowych. Próbka 1 została pobrana z obszaru, w którym nie ma widocznych wpływów procesu spawania (materiał bazowy).



Rys. 104. Próbka: a) przed badaniem, b) po badaniu (widoczne przewężenie)

Próbki z ramy spawanej wycinano z wykorzystaniem technologii Water-Jet bez korekcji ukosowania, średnica dyszy wynosiła 1 mm. Parametry wycinania odpowiednio dobrano dla danego gatunku stali i grubości ciętego materiału. Po wycięciu próbki poddano szlifowaniu. Tab. 13 przedstawia zestawienie oznaczeń i geometrii próbek.

Oznaczenie	g w mm	b w mm	Pole w mm ²
S1-	3,04	10,15	30,86
S2-	3,02	10,13	30,59
S3-	3,04	10,10	30,70
S4-	3,04	10,10	30,70
S5-	3,04	10,01	30,43
S6-	3,03	10,00	30,30
S7-	3,02	10,12	30,56
S8-	3,02	10,17	30,71
S9-	3,03	10,14	30,72
S10-	3,03	10,10	30,60
S11-	3,04	10,11	30,73
S _R 12-	3,03	10,34	31,33

Tab. 13. Wymiary części roboczej próbek pobranych z węzła

3.4.10. Badania spiętrzenia naprężeń wywołanego karbem geometrycznym jakim jest złącze spawane - hotspot

Badania przeprowadzono zgodnie z Procedurą badawczą laboratorium BP01 "Wytrzymałość w warunkach statycznego obciążenia". Szczegółowe warunki badania zaczerpnięto z normy PN-EN 10002-1:2004 oraz z normy PN-104/H-04334 "Próba niskocyklowego zmęczenia". Analizy "Hot Spot" wykonano w oparciu o [69] [102].

Do badań przygotowano 6 próbek, które wykonano zgodnie z normą PN-EN 10002-1: 2004 oraz normą PN-104/H-04334. Widok i wymiary próbek do badań przedstawiono na Rys. 105 i Rys. 106. Ważnym parametrem w tym przypadku jest równoległość oraz płaskość spawanych blach stosowana w celu zminimalizowania wpływu zginania na wyniki badań. Próbki wykonano zgodnie z technologią stosowaną w procesie produkcyjnym ram spawanych.

Przed badaniem próbki poddano identyfikacji wymiarów części pomiarowej. Wyniki pomiarów zestawiono w Tab. 14.



Rys. 105. Rysunek przedstawiający obiekty badań: a) widok grani, b) widok przekroju poprzecznego, c) widok lica spoiny

	Oznacz			V	Wymiar	y próbk	i		
L.p.	Uznacz.	B_1	B_2	B ₃	$\mathbf{B}_{\mathrm{\acute{s}r}}$	H_1	H_2	H_3	$\mathbf{H}_{\mathrm{\acute{s}r}}$
	PIODKI				m	m			
1	ST1	12,51	12,5	12,5	12,50	9,99	10	10,01	10,00
2	ST2	12,51	12,51	12,51	12,51	10,07	10,06	10,06	10,06
3	ST3	12,25	12,24	12,25	12,25	10,03	10,04	10,04	10,04
4	ST4	11,94	11,93	11,94	11,94	10,01	9,99	9,97	9,99
5	ST5	11,91	11,91	11,93	11,92	10,03	10,02	10,02	10,02
6	ST6	11,95	11,94	11,95	11,95	10,05	10,06	10,07	10,06

Tab. 14. Identyfikacja próbek do badań



Rys. 106. Wymiary próbek wykorzystywanych podczas badań

Przed rozpoczęciem badań rozkładu naprężeń w warunkach cyklicznych przystąpiono do przygotowania próbek do pomiaru odkształceń lokalnych. Część robocza próbki został wypolerowana i odtłuszczona w celu przyklejenia tensometrów oporowych. Na spreparowanych próbkach rozmieszczono tensometry oporowe o bazie pomiarowej 1x1mm i oporności 120,1 Ω . Widok przyklejonego tensometru przedstawiono na Rys. 107.



Rys. 107. Rysunek przedstawiający tensometr przyklejony do próbki w 40-krotnym powiększeniu

Tensometry na wszystkich próbkach rozmieszczono w takim sam sposób z zachowaniem odpowiednich odległości i wymiarów. Do pozycjonowania tensometrów na próbkach użyto mikroskopu warsztatowego PZO-MWD. Na Rys. 108 przedstawiono widok zamocowanej próbki na mikroskopie warsztatowym podczas naklejania tensometrów.



Rys. 108. Pozycjonowanie tensometrów na próbce spawanej

Dokładność pozycjonowania tensometrów wynosiła do 0,05 mm. Tensometry zostały umieszczone możliwie blisko grani, jak i lica spoiny. Naklejono je również na powierzchni bocznej spoiny. Na powierzchni każdej próbki umieszczano w sumie 8 tensometrów oporowych.

Na Rys. 109 pokazano schemat rozmieszczenia tensometrów na próbce względem spoiny doczołowej. Tensometry 8 i 4 są umieszczone w odległości od spoiny równej 0,4 i 1 grubości materiału próbki. Takie położenie jest spowodowane wymogami stawianymi przez metodykę "Hot Spot" [102].

Na Rys. 110 przedstawiono przykład naklejonych tensometrów na powierzchni próbki.



Rys. 109. Siatka rozmieszczenia tensometrów



Rys. 110. Rysunek przedstawia układ tensometrów rozlokowanych na próbce: a) po stronie grani spoiny, b) na części bocznej próbki, c) próbka gotowa

Niskocyklowe badania zmęczeniowe przeprowadzono na trzech poziomach amplitudy odkształcenia całkowitego ε_{ac} oraz współczynniku asymetrii R = -1 $(R = \varepsilon_{min}/\varepsilon_{max})$. Badania prowadzono w warunkach kontrolowanego odkształcenia całkowitego ε_{ac} =const. Wartości parametrów dla zrealizowanych programów obciążenia zestawiono w Tab. 15.

Tab. 15. Parametry programów obciążenia

Przebieg obciążenia	Nazwa programu	Parametry obciążenia		
	Obciążenie stałoamplitudowe	$\varepsilon_{ac1}=0.05\%$ $\varepsilon_{ac2}=0.1\%$		
$ \qquad \lor \qquad \lor \qquad \lor \qquad \lor \qquad \lor \qquad \lor \qquad t$	<i>f</i> =0,2 Hz	$c_{ac3} = 0, 13$ 70		

Badania zmęczeniowe polegały na poddawaniu próbki obciążeniu zmiennemu do chwili powstania pęknięcia zmęczeniowego. Podczas badań odkształcenia próbki mierzono przy pomocy ekstensometru o bazie 10 mm i zakresie pomiarowym $\pm 1\%$ mocowanego na części pomiarowej próbki poza strefami wpływu ciepła i poza obszarem rozmieszczenia tensometrów. Na Rys. 111 przedstawiono widok przykładowej próbki (wraz z ekstensometrem) zamocowanej w uchwytach maszyny wytrzymałościowej.

Badania przeprowadzono w temperaturze 21 °C. Częstotliwość obciążenia *f* wynosiła 0,2 Hz. Jako kryterium końca próby zmęczeniowej przyjęto około 5% obniżenie siły obciążającej w półcyklu rozciągania w stosunku do jej wartości dla okresu stabilizacji. Podczas badań rejestrowano dla wybranych cykli obciążenia wartości chwilowe siły obciążającej oraz odkształcenia próbki w 8 punktach tensometrycznych. Przyjęta częstość próbkowania sygnału siły i odkształcenia pozwalała opisywać rejestrowane cykle obciążenia 200 punktami.



Rys. 111. Widok przygotowanej do badań próbki zamocowanej w uchwytach maszyny wytrzymałościowej

3.4.11. Badanie spawanego węzła konstrukcyjnego

Badania przeprowadzono zgodnie z PN-EN 13749:2011 – Punkt 6.2.3 i Punkt 6.2.4 "Kolejnictwo - Zestawy kołowe i wózki - Metody określania wymagań konstrukcyjnych dla ram wózków" oraz "Instrukcją wewnętrzną klejenia tensometrów" OI-07 z dnia 01.10.2016.

Ze względu na znaczne koszty obiektu do badań przygotowano tylko jedną próbkę. Próbką oznaczoną jako "Węzeł" przedstawiono na Rys. 112b. Zgodnie z założeniami próbka będąca fragmentem konstrukcji wózka pojazdu szynowego (Rys. 112a) została wykonana z tych samych materiałów oraz technologią stosowaną podczas produkcji kompletnej ramy pojazdu szynowego. W węźle wprowadzono liczne uproszczenia konstrukcyjne nie mające wpływu na wynik prowadzonych analiz. Wszystkie wprowadzone uproszczenia i sposób określenia geometrii węzła wynikają z założeń wstępnych i z zrealizowanych analiz MES (3.3). Uproszczenia obejmowały między innymi:

- wykonywanie otworów gwintowanych,
- szlifowanie otworów montażowych,
- szlifowanie powierzchni tolerowanych,
- frezowanie gniazd montażowych w monoblokach stali, itp.

Przed przystąpieniem do badań na węźle zostało zamocowanych (przyklejonych) 15 przetworników tensometrycznych. Tensometry naklejono w obszarach wytypowanych podczas analizy numerycznej. Użyte podczas badań tensometry posiadały rezystancję 120 Ω i bazę pomiarową 6 mm. Mocowanie tensometrów do ramy wykonano zgodnie z instrukcją stanowiskową Laboratorium badań Materiałów i Konstrukcji. Mocowanie tensometrów

przeprowadzono na ramie znajdującej się w stanie swobodnym poza stanowiskiem badawczym (bez obciążenia). Sposób montażu ramy na stanowisku badawczym zapewniał możliwość przeniesienia obciążenia i reakcji odpowiadających obciążeniom w trakcie eksploatacji przy równoczesnym odkształceniu ramy w analizowanych punktach pomiarowych. Na Rys. 113 przedstawiono szczegóły montażu węzła na stanowisku badawczym.



Rys. 112. Modelowy węzeł ramy wózka: a) położenie węzła w obiekcie, b) wykonany węzeł modelowy (złożony)

Badanie prowadzono na stanowisku do badań obiektów wielkogabarytowych wyposażonym w serwocylinder hydrauliczny IST. Badania przeprowadzono w temperaturze 22 °C. W trakcie testów rejestrowano chwilowe wartości siły obciążającej na serwocylindrze oraz wartości odkształceń rejestrowane na mostku tensometrycznym MGcPlus. Na Rys. 114 przedstawiono widok stanowiska badawczego. Przebieg programu badania węzła ramy

przedstawiono w Tab. 5. Na Rys. 115 przedstawiono przebieg programu obciążenia dla dwóch poziomów obciążenia. Na każdym poziomie znajdują się dwa bloki. Zmiana pomiędzy poziomami była realizowana po 8 mln cykli. Badanie uznawano za zakończone po sumarycznym przeprowadzeniu 10 mln cykli obciążenia.



Rys. 113. Sposób montażu węzła spawanego z widocznym nieosiowym położeniem siłownika



Rys. 114. Obiekt badawczy na stanowisku



Rys. 115. Przebieg programu obciążenia dla węzła

3.4.12. Badanie próbki wielkogabarytowej - ramy wózka tramwajowego

Badania przeprowadzono zgodnie z PN-EN 13749:2011 – Punkt 6.2.3 i Punkt 6.2.4 "Kolejnictwo - Zestawy kołowe i wózki - Metody określania wymagań konstrukcyjnych dla ram wózków" oraz "Instrukcją wewnętrzną klejenia tensometrów" OI-07 z dnia 01.10.2016.

Podobnie jak w przypadku węzła kompletną strukturę złożonej ramy spawanej przygotowano tylko w postaci jednej próbki. Obiekt badań oznaczony jako "Rama" przedstawiono na Rys. 112a. W celu utrzymania spójności pomiarów technologia wykonania próbki była taka sama jak dla wszystkich wykorzystywanych w pracy obiektów badań.

Przed przystąpieniem do badań na ramie wózka zostało zamocowanych (przyklejonych) 110 przetworników tensometrycznych. Tensometry naklejono w obszarach o największych odkształceniach zdeterminowanych podczas analiz MES (3.3). Część przetworników tensometrycznych (15 sztuk) umiejscowiono na próbce ramy dokładnie w tych samych miejscach jak na próbce węzła spawanego, którego proces badawczy przedstawiono w podrozdziale 3.4.11. Zabieg ten ma na celu ułatwienie porównania uzyskanych wyników. Z punktu widzenia przedstawianej pracy szczegóły geometryczne badanej ram nie są istotne. Użyte podczas badań tensometry posiadały rezystancję 120 Ω i bazę pomiarową 6 mm. Mocowanie tensometrów do ramy wykonano zgodnie z instrukcją stanowiskową Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji. Mocowanie tensometrów przeprowadzono na ramie znajdującej w stanie swobodnym poza stanowiskiem badawczym (bez obciążenia). Sposób montażu ramy na stanowisku badawczym zapewniał możliwość przeniesienia siły i reakcji w sposób odpowiadający obciążeniom w trakcie eksploatacji przy równoczesnym

umożliwieniu powstania odkształceń ramy w analizowanych punktach pomiarowych. Badania przeprowadzono na stanowisku omówionym w rozdz. 2.4.3.

Badanie prowadzono na stanowisku do badań obiektów wielkogabarytowych wyposażonym w serwocylindry hydrauliczne IST. Badania przeprowadzono w temperaturze 22 °C. W trakcie próby obciążania rejestrowano chwilowe wartości siły obciążającej oraz wartości odkształceń rejestrowane na mostku tensometrycznym MGcPlus. Na Rys. 116 przedstawiono widok modelu stanowiska badawczego wykorzystywanego w symulacjach procesu badawczego.

Na Rys. 117 przedstawiono widok rzeczywistego stanowiska badawczego przed badaniem, a na Rys. 118 fragment ramy z umiejscowionymi tensometrami. Przebieg programu badawczego ramy jest przedstawiony w Tab. 3 i Tab. 4.



Rys. 116. Obiekt badawczy na stanowisku



Rys. 117. Widok wózka tramwajowego na stanowisku badawczym



Rys. 118. Fragment ramy wózka z naklejonymi tensometrami

Na Rys. 119 przedstawiono przebieg programu obciążenia dla dwóch poziomów obciążenia. Na każdym poziomie są realizowane dwa osobne bloki obciążenia. Zmiana pomiędzy blokami następuje co 10 cykli obciążenia. Zmiana pomiędzy poziomami zachodzi po 8 mln cykli. Badanie uznano za zakończone po sumarycznym przeprowadzeniu 10⁷ cykli obciążenia.



Rys. 119. Przebieg programu obciążenia dla ramy: a) pierwszy poziom obciążenia do 8 mln cykli, b) drugi poziom obciążenia do 2 mln cykli

3.5. WYNIKI BADAŃ WŁASNYCH

Zrealizowane badania miały wykazać zależności pomiędzy właściwościami próbek, stopniem ich złożoności, metodyką badawczą a zaproponowana tezą pracy. W trakcie realizacji badań prowadzono równolegle analizę wyników, która nie tylko miała na celu osiągniecie założeń postawionych w tezie pracy, ale również miała na celu optymalizację kolejnych etapów prowadzenia badań. Przykładem może być ograniczenie badań do jednej grubości blach, które jest wynikiem analizy badań prowadzonych na próbkach o różnych grubościach.

3.5.1. Wyniki badania udarności

Wszystkie badane próbki uległy rozdzieleniu w miejscu karbu. Po dokonaniu pomiaru pracy łamania przeprowadzono analizę uzyskanych przełomów. Analizę przeprowadzono nieuzbrojonym okiem. Przeprowadzone obserwacje nie wykazały występowania wad ani wtrąceń materiałowych (Rys. 120, Rys. 121). Wyniki badań udarności zestawiono w Tab. 16 dla próbek "Pr" oraz w Tabela 17 dla próbek "Row". Ponadto na Rys. 122 przedstawiono rozrzut wyników wraz z zaznaczonymi wartościami mediany dla poszczególnych rodzajów prób.

Przeprowadzona analiza wykazała dużą powtarzalności uzyskanych wyników dla poszczególnych rodzajów próbek. Jak należało oczekiwać kierunek walcowania ma wpływ na uzyskane wyniki udarności. Wyniki udarności dla próbek położonych prostopadle do kierunku walcowania (próbki "Pr") są średnio ok. 490 kJ/m² mniejsze w stosunku do udarności próbek położonych równolegle do kierunku walcowania ("Row"). Ponadto zauważalna jest zmiana odchylenia standardowego uzyskanych wyników: udarność dla kierunku równoległego ma odchylenie standardowe na poziomie 13 J, a dla kierunku prostopadłego na poziomie 51 J. Świadczy to nie tylko o występowaniu niewielkiej anizotropii kierunkowej, ale również o mniejszej jednorodnosci materiałowej dla kierunku prostopadłego do kierunku walcowania blach.



Rys. 120. Przełomy trzech pierwszych próbek z serii "Pr"



Rys. 121. Prze	elomy trzech	pierwszych	próbek z se	erii "Row"
----------------	--------------	------------	-------------	------------

	KU2, J	KCU, kJ/m ²
Pr_1	59,7	1173
Pr_2	61,7	1276
Pr_3	58,0	1178
Pr_4	62,3	1244
Pr_5	57,3	1153
Pr_6	56,3	1122
Pr_7	57,4	1158
Pr_8	57,5	1166
Pr_9	62,4	1261
Pr_10	57,9	1182
Średnia	59,05	1191
Odchylenie standardowe	2,30	51
Mediana	57,95	1175

 Tab. 16.
 Wyniki badań dla próbek "Pr" pobranych prostopadle do kierunku walcowania

Tabela 17.Wyniki badań dla próbek "Row" pobranych równolegle do kierunku walcowania

	KU2, J	KCU, kJ/m ²
Rów_1	82,4	1676
Rów_2	83,3	1686
Rów_3	83,2	1674
Rów_4	82,4	1668
Rów_5	83,6	1698
Rów_6	83,5	1689
Rów_7	82,7	1672
Rów_8	82,3	1658
Rów_9	83,0	1685
Rów_10	82,0	1662
Średnia	82,84	1677
Odchylenie standardowe	0,56	13
Mediana	82,85	1675



Rys. 122. Rozkład udarności w poszczególnych pomiarach

3.5.2. Wyniki badań składu chemicznego

Wyniki badań składu chemicznego przygotowanych próbek zestawiono w Tab. 18 do Tab. 23. Zestawione wyniki dotyczą jedynie najważniejszych pierwiastków z zakresu pomiarowego spektrometru (Rozdział 3.4.2).

	Fe	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Nb	V
1	98,02	0,15	0,17	1,46	0,0063	0,002	0,032	0,005	0,014	0,043	0,0031	0,0095	0,0015
2	97,97	0,15	0,17	1,52	0,0065	0,002	0,029	0,005	0,014	0,043	0,0044	0,0043	0,0015
3	97,96	0,14	0,18	1,5	0,0063	0,002	0,029	0,0062	0,012	0,046	0,0042	0,0073	0,0015
4	97,94	0,15	0,18	1,48	0,0086	0,002	0,031	0,0055	0,016	0,047	0,0069	0,0053	0,0015
5	97,98	0,15	0,17	1,48	0,0064	0,002	0,031	0,005	0,018	0,045	0,0067	0,011	0,0015
Śr.	97,97	0,148	0,174	1,488	0,0068	0,002	0,03	0,005	0,015	0,045	0,0051	0,0075	0,0015

Tab. 18. Wyniki analizy składu chemicznego próbki D -16 mm

Tab. 19. Wyniki analizy składu chemicznego próbki B -14 mm

	Fe	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Nb	V
1	97,76	0,2	0,23	1,48	0,0103	0,002	0,02	0,005	0,007	0,059	0,0149	0,0145	0,0015
2	97,67	0,18	0,23	1,54	0,0101	0,002	0,026	0,009	0,011	0,058	0,0162	0,0181	0,0015
3	97,71	0,2	0,26	1,51	0,0087	0,002	0,023	0,005	0,007	0,062	0,0177	0,0163	0,0024
4	97,79	0,18	0,23	1,49	0,0084	0,002	0,023	0,007	0,008	0,056	0,0146	0,0162	0,0015
5	97,72	0,18	0,24	1,49	0,0116	0,002	0,022	0,009	0,011	0,063	0,0175	0,0119	0,0015
Śr.	97,71	0,188	0,238	1,5	0,0098	0,002	0,023	0,007	0,009	0,06	0,0162	0,0154	0,0017

Tab. 20. Wyniki analizy składu chemicznego próbki C -12 mm

	Fe	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Nb	V
1	98,07	0,15	0,23	1,44	0,003	0,002	0,002	0,005	0,005	0,052	0,0116	0,0128	0,0015
2	97,92	0,16	0,22	1,47	0,0096	0,002	0,018	0,005	0,006	0,051	0,0118	0,008	0,0015
3	97,91	0,16	0,21	1,48	0,0079	0,002	0,016	0,005	0,005	0,051	0,0136	0,0121	0,0015
4	97,96	0,16	0,21	1,48	0,0089	0,002	0,021	0,005	0,0065	0,05	0,0098	0,0057	0,0015
5	97,97	0,15	0,21	1,48	0,0075	0,002	0,015	0,005	0,005	0,052	0,0128	0,0068	0,0015
Śr.	97,97	0,156	0,216	1,47	0,0074	0,002	0,014	0,005	0,0055	0,0512	0,0119	0,0091	0,0015

Tab. 21.Wyniki analizy składu chemicznego próbki węzła spawanego spoiny
doczołowej o grubości 10 mm

	Fe	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Nb	V
1	97,88	0,17	0,22	1,49	0,0078	0,002	0,02	0,005	0,005	0,053	0,014	0,0022	0,0015
2	97,92	0,17	0,23	1,45	0,0094	0,002	0,016	0,005	0,005	0,054	0,0133	0,0149	0,0015
3	97,88	0,16	0,23	1,47	0,0109	0,002	0,017	0,005	0,005	0,0523	0,0127	0,0068	0,0015
4	97,98	0,18	0,17	1,44	0,0133	0,002	0,029	0,007	0,01	0,038	0,0028	0,0043	0,0015
5	98,08	0,15	0,16	1,42	0,0059	0,002	0,018	0,007	0,007	0,035	0,0035	0,0081	0,0015
Śr.	97,95	0,166	0,202	1,45	0,0095	0,002	0,02	0,006	0,006	0,046	0,0093	0,0073	0,0015

Tab. 22. Wyniki analizy składu chemicznego próbki fragmentu węzła spawanego grubości 10 mm

	Fe	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Nb	V
1	97,62	0,19	0,37	1,32	0,013	0,002	0,062	0,007	0,035	0,036	0,2462	0,0028	0,0015
2	97,52	0,19	0,4	1,37	0,015	0,002	0,057	0,009	0,025	0,037	0,2633	0,0062	0,0015
3	97,66	0,18	0,37	1,32	0,012	0,002	0,062	0,008	0,031	0,033	0,2494	0,002	0,0015
4	97,55	0,17	0,38	1,38	0,012	0,002	0,061	0,01	0,035	0,033	0,2506	0,0049	0,0015
5	97,5	0,18	0,39	1,32	0,012	0,002	0,065	0,011	0,03	0,037	0,2631	0,0031	0,0015
Śr.	97,57	0,182	0,382	1,342	0,013	0,002	0,061	0,009	0,031	0,035	0,2545	0,0038	0,0015

Tab. 23. Wyniki analizy składu chemicznego próbki wielkogabarytowej o grubości 10 mm

	Fe	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Nb	V
1	97,85	0,19	0,23	1,38	0,01	0,002	0,127	0,0083	0,026	0,033	0,0155	0,0186	0,0015
2	97,75	0,18	0,27	1,4	0,012	0,002	0,124	0,0084	0,026	0,033	0,0163	0,0203	0,0015
3	97,72	0,18	0,24	1,36	0,011	0,002	0,129	0,013	0,027	0,041	0,0203	0,0144	0,0015
4	97,68	0,17	0,25	1,45	0,012	0,002	0,131	0,011	0,027	0,035	0,0194	0,0219	0,0015
5	97,74	0,17	0,23	1,41	0,011	0,002	0,124	0,011	0,026	0,038	0,0209	0,0166	0,0015
Śr.	97,75	0,178	0,244	1,4	0,011	0,002	0,127	0,01	0,026	0,036	0,0185	0,0184	0,0015

Uzyskane wyniki wartości średnich pomiaru procentowej zawartości poszczególnych pierwiastków chemicznych mieszczą się zakresie pomiarowym zastosowanego urządzenia, co pozwoliło uznać wyniki za ważne. Analiza szczegółowa uzyskanych wyników przeprowadzona zgodnie z normą PN-EN 10025 pozwoliła zaklasyfikować materiał wszystkich próbek jako stal S355J2+N, gdyż mieszczą się one w zakresie zawartości procentowej pierwiastków przedstawionym w Tab. 24 zaczerpniętym z przytoczonej normy.

Gatunek stali		Maksymalne udziały wagowe, %							
PN-EN	Rodzaj stali	C dla grubości nominalnych, mm			M	а.	D	G	Ŋ
10025:2002		< 16	>16 <40	>40	MIN	51	Р	5	IN
S353J2+N	BS	0,17	0,17	0,2	1,4	_	0,035	0,035	0,012

Tab. 24. Skład chemiczny stali S355J2+N wg normy PN-EN 10025

3.5.3. Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie próbek gładkich

Wszystkie badane próbki uległy pęknięciu w obszarze bazy pomiarowej ekstensometru. Na Rys. 123 przedstawiono dwa charakterystyczne etapy rozciągania próbki: etap tworzenia się przewężenia na próbce (Rys. 123a) oraz rozdzielenie próbki kończące próbę statycznego rozciągania (Rys. 123b). Uzyskane podczas badań statycznych przełomy próbek poddano oględzinom. Nie stwierdzono występowania w nich wad ani wtrąceń.



Rys. 123. Przebieg uszkodzenia próbek podczas prób statycznego rozciągania: a) tworzenie się przewężenia, b) powstanie pęknięcia - koniec próby

Wyniki prób statycznego rozciągania przedstawiono na Rys. 124 - Rys. 126 w formie wykresu rozciągania w układzie współrzędnych wydłużenie względne próbki ε - naprężenie σ . Naprężenia w próbce poddanej obciążeniu rozciągającemu obliczano dzieląc zarejestrowane podczas próby chwilowe wartości siły obciążającej przez pole przekroju początkowego próbki.

Wykonane wykresy rozciągania poddano szczegółowej analizie mającej na celu wyznaczenie podstawowych parametrów wytrzymałościowych. Ich analiza wykazała, że wszystkie badane próbki charakteryzowały się takim samym przebiegiem naprężenia w funkcji odkształcenia oraz występowaniem wyraźnej granicy plastyczności. Najważniejsze wyniki opracowania wykresów rozciągania uzyskanych dla różnych grubości próbek zestawiono w Tab. 25.

Na Rys. 127 zestawiono rozkłady wartości średnich czterech podstawowych parametrów badanych próbek o trzech grubościach i dwóch kierunkach walcowania.



Rys. 124. Wykresy rozciągania przykładowych próbek o grubości 12 mm z serii P i W



Rys. 125. Wykresy rozciągania przykładowych próbek o grubości 14 mm z serii P i W



Rys. 126. Wykresy rozciągania przykładowych próbek o grubości 16 mm z serii P i W

	0	Carrie	b ₁	b ₂	b ₃	g1	g ₂	S	A ₇₀	R _m	R _{eH}	R _{eL}
L.p.	Ozn.	Seria		-	mm			mm ²	%		MPa	-
1	PB01		14,98	14,96	14,96	11,92	11,97	178,8	33,5	561	398	388
2	PB02	Р	14,98	14,99	14,98	11,95	11,98	179,3	30,1	558	391	379
3	PB03		14,99	14,97	14,96	11,98	11,93	179,0	34,8	512	432	440
Średnia						32,8	543,6	407	402,4			
1	PB11		15,03	15,02	15,02	11,83	11,87	178,0	28,5	535	435	415
2	PB12	W	15,02	15,01	15,05	11,87	11,85	178,2	33,1	539	442	389
3	PB13		15,03	15,02	15,04	11,9	11,87	178,6	30,8	559	397	405
				Średnia	ı				30,8	544,3	424,7	403,1
1	PC01		14,94	14,95	14,94	13,93	13,9	207,9	36,4	584	478	448
2	PC02	Р	14,94	14,99	14,97	13,94	13,91	208,4	28,15	560	485	415
3	PC03		14,95	14,95	14,95	13,89	13,91	207,8	31,75	583	445	417
Średnia				32,1	575,8	469,3	426,5					
1	PC11		14,94	14,93	14,93	13,86	13,84	206,8	34,8	574	487	411
2	PC12	W	14,98	15	14,97	13,89	13,86	207,9	31,7	581	445	403
3	PC13		14,99	15,01	14,99	13,88	13,9	208,3	30,7	572	456	463
				Średnia	ı				32,4	575,7	462,8	425,5
1	PD01		15	15	15,01	16,17	16,18	242,7	40,1	534	428	375
2	PD02	Р	14,98	15	15,01	16,21	16,22	243,2	38,2	522	232	402
3	PD03		15	15,02	14,99	16,18	16,23	243,1	33	562	602	386
Średnia					37,1	539,3	420,6	387,8				
										•	•	•
1	PD11		15,05	15,04	15,04	16,18	16,2	243,6	32,6	552	415	401
2	PD12	W	15,03	15,03	15,01	16,24	16,2	243,7	33,9	546	411	421
3	PD13	1	15,06	15,04	15,04	16,17	16,19	243,5	39,4	524	442	365
Średnia					35,3	540,7	422,7	395,7				

 Tab. 25.
 Zestawienie pomiarów geometrii próbek i wyników badań wytrzymałościowych



Rys. 127. Rozkład parametrów wytrzymałościowych

Dla porównania uzyskanych wyników w Tab. 26 zestawiono różnice procentowe parametrów wytrzymałościowych ustalonych na podstawie próby statycznego rozciągania próbek dla dwóch kierunków walcowania (próbki PB, PC, PD) w stosunku do wartości średniej. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że największe różnice dotyczą wydłużenia A_{70} (od 0,9 do 6,5%). Najmniejsze zróżnicowanie dotyczy parametru R_m (od 0,0 do 0,2%) oraz R_{el} gdzie różnica maksymalna wynosi 0,2 %.

D (Oznaczenie serii próbek					
Parametry	PB	PC	PD			
wytrzymałościowe	%					
A ₇₀	6,5	0,9	5,1			
R _m	0,1	0,0	0,2			
R _{eH}	4,2	1,4	0,5			
Ra	0.2	0.2	2.0			

Tab. 26. Zestawienie różnic procentowych w stosunku do średniej parametrów wytrzymałościowych w zależności od kierunku walcowania próbek dla trzech grubości materiału PB = 12mm, BC = 14mm, PD = 16mm

W Tab. 27 porównano wyniki uzyskane na podstawie 18 próbek. Rozrzut wyników w stosunku do wartości mierzonego parametru zdefiniowanego jako wartość średnią wynosi 10% dla wydłużenia przy zerwaniu A_{70} i 6% dla górnej granicy plastyczności R_{eH} . Analiza doniesień literaturowych pozwala stwierdzić, że największy rozrzut wyników dotyczący parametru A_{70} nie ma wpływu na osiągniecie celu pracy [86,89,114,115]. Ponadto teza pracy będzie weryfikowana na spawanych węzłach, w których to do zniszczenia dochodzi głównie w SWC, a wpływ zmian cieplnych tej strefy na wyniki wytrzymałościowe uzyskano z odchyleniem standardowym wynoszącym maksymalnie 4%. Ponadto weryfikacja tezy pracy przebiegać będzie na spawanych węzłach, w których do zniszczenia dochodzi głównie w SWC. Zgodnie z doniesieniami literaturowymi dla materiału o anizotropii objawiającej się małym rozrzutem uzyskanych wyników badań wytrzymałościowych R_m (Tab. 27) wpływ zmian cieplnych wywołanych SWC spowoduje pełną homogenizację materiału [116]. Dlatego też można przyjąć badany materiał jako izotropowy.

 Tab. 27.
 Odchylenie standardowe dla wyników próby statycznego rozciągania próbek płaskich

	A ₇₀	R _m	R _{eH}	R _{eL}
	%		MPa	
Średnia arytmetyczna	33	553	435	407
Odchylenie standardowe	3,4	22,1	69,7	25,5
Współczynnik zmienności	10%	4%	16%	6%

3.5.4. Wyniki badań niskocyklowych próbek gładkich

Podczas badań zmęczeniowych obserwowano zmiany parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia. Odzwierciedleniem występujących zmian były między innymi zmiany kształtu pętli histerezy rejestrowanej w różnych okresach trwałości zmęczeniowej. Charakter obserwowanych zmian był zależny od poziomu odkształcenia ε_{ac} . W celu zilustrowania na Rys. 128 przedstawiono przykładowe pętle histerezy uzyskane na dwóch poziomach odkształcenia ($\varepsilon_{ac} = 0,3\%$ i 1,2%). Na rysunkach oznaczono numery cykli odpowiadających przedstawionym pętlom histerezy.



Rys. 128. Petle histerezy na poziomie: a) 0,3%, b) 1,2%

Na poziomie najniższym ($\varepsilon_{ac} = 0,3\%$) naprężenie maksymalne σ_{max} , jak również minimalne σ_{min} ulegają zmniejszaniu wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia. Odmienna sytuacja występuje na wyższym poziomie odkształcenia ($\varepsilon_{ac} = 1,2\%$). W tym przypadku naprężenia σ_{max} , jak i σ_{min} nieznacznie wzrastają. Zmiany kształtu pętli oraz jej parametrów obserwowano na wszystkich poziomach odkształcenia. Świadczy to o nieznacznych zmianach właściwości cyklicznych badanej stali w trakcie obciążenia zmiennego i braku wyraźnego okresu stabilizacji.

Analizę własności cyklicznych próbek ze stali S355JR+N w warunkach obciążeń zmiennych prowadzono z wykorzystywaniem parametrów pętli histerezy mających bezpośredni wpływ na wyniki opracowania. Zaliczono do nich takie parametry jak: ε_{ac} , ε_{ap} , ε_{ae} , σ_a . Ich wartości określano na podstawie zarejestrowanych podczas badań chwilowych wartości siły obciążającej próbkę i odkształceń mierzonych ekstemsometrem. Wartości naprężeń chwilowych w próbce σ obliczano dzieląc wartość chwilowej siły obciążającej przez pole przekroju początkowego próbki. Na Rys. 129 zestawiono przebiegi zmian amplitudy naprężenia σ_a oraz amplitudy odkształcenia plastycznego ε_{ap} w funkcji liczby cykli obciążenia uzyskane na 8 poziomach odkształcenia całkowitego ε_{ac} .



Rys. 129. Zmiany parametrów pętli histerezy w trakcie prób zmęczeniowych: a) σ_a , b) ε_{ap}

Wykresy przedstawione na Rys. 129 potwierdzają zmiany parametrów kształtu pętli obserwowanych na Rys. 128. Na najniższych poziomach odkształcenia (ε_{ac} od 0,25% do 0,5%) naprężenie σ_a ulega obniżeniu (Rys. 129a), a odkształcenie plastyczne ε_{ap} nieznacznie wzrasta (Rys. 129b). Powyższe świadczy o osłabieniu stali na tych poziomach. Natomiast na poziomach $\varepsilon_{ac} > 0,5\%$ naprężenie σ_a nieznacznie wzrasta, a odkształcenie ε_{ap} maleje, co oznacza umocnienie stali na tych poziomach. Procesy osłabienia, jak i umocnienia próbek ze stali S55JR+N widoczne są zarówno w opisie naprężeniowym (Rys. 129a), jak i odkształceniowym (Rys. 129b). W przebiegach zmian parametrów pętli histerezy można wyróżnić trzy charakterystyczne etapy. W celu ich zilustrowania na Rys. 130 i Rys. 131 przedstawiono w sposób szczegółowy zmiany parametrów pętli histerezy na dwóch poziomach odkształcenia, w których obserwowano umocnienie ($\varepsilon_{ac} = 1,0\%$) oraz osłabienie ($\varepsilon_{ac} = 0,3\%$).



Rys. 130. Zmiany parametrów pętli podczas próby zmęczeniowej na poziomie $\varepsilon_{ac} = 1\%$: a) σ_{a} , b) ε_{ap}



Rys. 131. Zmiany parametrów pętli podczas próby zmęczeniowej na poziomie $\varepsilon_{ac} = 0,3 \%$: a) σ_{a} , b) ε_{ap}

Na podstawie analizy wykresów przedstawionych na Rys. 130 i Rys. 131 można stwierdzić, że w przebiegach zmian parametrów pętli histerezy wyróżnia się trzy charakterystyczne etapy:

- Etap I Materiał podlega wyraźnemu osłabieniu. Długość tego etapu zależy od poziomu odkształcenia i wynosi od 8% wszystkich cykli do powstania pęknięcia N_f na poziomie $\varepsilon_{ac} = 0,3\%$ do około 5% wszystkich cykli do wystąpienia pęknięcia na poziomie $\varepsilon_{ac} = 1,2\%$.
- Etap II Właściwości stali na tym etapie zależą od poziomu odkształcenia. Na poziomach najniższych ($\varepsilon_{ac} = 0,3\%$ i 0,25%) stal ulega nieznacznemu dalszemu osłabieniu. Widoczne jest to w przebiegach obydwu analizowanych parametrów pętli histerezy. Na wyższych realizowanych poziomach odkształcenia ($\varepsilon_{ac} > 0,5\%$) stal ulega wyraźnemu umocnieniu. Długość tego etapu obejmuje od około 80% wszystkich cykli do pęknięcia N_f .
- Etap III Materiał na tym etapie, niezależnie od poziomu odkształcenia, ulega silnemu osłabieniu. W etapie tym zostaje zainicjowane pęknięcie,

które się rozwija aż do pęknięcia zmęczeniowego. Długość tego etapu zależy również od poziomu odkształcenia i wynosi od kilku procent cykli do pęknięcia N_f na najwyższym poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 2\%$ do kilkunastu procent wszystkich cykli do pęknięcia na poziomie odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,25\%$.

Szczegółowa analiza wykresów przedstawionych na Rys. 129 i Rys. 131 pozwala stwierdzić, że poziom odkształcenia ε_{ac} wpływa również na wielkość zmian właściwości cyklicznych (osłabienia lub umocnienia) podczas próby zmęczeniowej. Do oceny wpływu poziomu odkształcenia na zmiany podstawowych parametrów pętli wprowadzono współczynnik zmian właściwości cyklicznych $\Delta \sigma_{wzgl}$ opisany zależnością

$$\Delta \sigma_{wzgl} = \frac{\Delta \sigma_i}{\Delta \sigma_1} \tag{19}$$

Na Rys. 132 zamieszczono zmiany współczynnika $\Delta \sigma_{wzgl}$ w funkcji trwałości względnej *n/N*. Wykresy $\Delta \sigma_{wzgl}$ potwierdzają wyniki badań przedstawione na Rys. 129 i Rys. 131. Przebiegi wykresów $\Delta \sigma_{wzgl}$ wskazują na umocnienie stali na najwyższych poziomach ($\Delta \sigma_{wzgl} > 0,9$), natomiast na najniższych na osłabienie ($\Delta \sigma_{wzgl} < 0,9$). Wielkość osłabienia stali wzrasta wraz z obniżaniem poziomu odkształcenia.



Rys. 132. Zmiany współczynnika $\Delta \sigma_{wzgl}$ w funkcji *n/N* na ośmiu poziomach odkształcenia

Występujące zmiany parametrów pętli histerezy i brak wyraźnego okresu stabilizacji utrudniają opracowanie uzyskanych wyników badań. Dotyczy to przede wszystkim określenia okresu trwałości, z którego pobierane są parametry pętli histerezy reprezentatywne na danym poziomie odkształcenia.

Do analitycznego opisu zależności pomiędzy naprężeniem σ_a a odkształceniem ε_{ap} wykorzystano równanie (3). Ze względu na zmiany parametrów pętli histerezy (σ_a i ε_{ap}) w funkcji liczby cykli obciążenia wartości współczynnika *K'* oraz wykładnika *n'* równania zależą od okresu trwałości, w którym wyznaczono σ_a i ε_{ap} . Jak można zauważyć na Rys. 133 parametry *n'* i K' mają bardzo zbliżone do siebie przebiegi w różnych okresach trwałości. W celu zilustrowania wpływu przyjętego okresu trwałości do określenia parametrów pętli σ_a i ε_{ap} na wartości n' i K' wyznaczono te parametry w różnych okresach trwałości definiowanych trwałością względną n/N. Uzyskane wartości n' i K' w różnych okresach trwałości zestawiono w postaci wykresów na Rys. 134.



Rys. 133. Wyniki analiz wykresów cyklicznych dla okresów trwałości 0,1; 0,5; 0,9 opisanych krzywą Ramberga-Osgooda



Rys. 134. Parametry n' i K' w funkcji n/N

Na Rys. 133, oprócz wykresu opisującego jedynie zależność pomiędzy parametrami pętli w okresie n/N = 0.5, przedstawiono dodatkowo przebiegi dla parametrów pętli (σ_a i ε_{ap}) określonych w dwóch innych okresach trwałości

zmęczeniowej, tj. n/N = 0,1 oraz n/N = 0,9. Na podstawie położenia wykresów na Rys. 133 można stwierdzić, że zmiany parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia powodują zróżnicowanie w modelach wykorzystywanych podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej. Jak należało oczekiwać zróżnicowanie dotyczy przede wszystkim obszaru małych odkształceń, dla których wielkość osłabienia stali była największa. Na podstawie analizy wykresów parametrów n'i K' przedstawionych na Rys. 134 można stwierdzić, że w ich przebiegu można zaobserwować 3 etapy zgodne z etapami osłabienia, stabilizacji i zniszczenia widocznymi na Rys. 130 i Rys. 131.

Do zweryfikowania poprawności opisu funkcji Ramberga-Osgooda wykorzystano współczynnik determinacji R^2 . Zauważyć należy, że wynik R^2 dla 0,1 okresu trwałości odbiega w niewielkim stopniu od okresu n/N = 0.5 i 0,9 i jest spowodowane zmianą właściwości cyklicznych próbek w zależności od poziomu odkształcenia w początkowej fazie. Wywołane jest to efektem umocnienia części próbek obciążanych na największych poziomach i osłabienia próbek badanych na najniższych poziomach. Wynik R^2 dla okresów trwałości n/N = 0,5 i 0,9 są bardzo do siebie zbliżone. Wnioskować więc na tej podstawie można o zbliżonym przebiegu fazy stabilizacji i zniszczenia materiału dla próbek badanych na różnych poziomach obciążenia.

Wpływ poziomu odkształcenia na właściwości cykliczne badanej stali potwierdza również położenie wykresów cyklicznego odkształcenia oraz wykresów rozciągania. Przykładowe wykresy statycznego oraz cyklicznego odkształcenia uzyskane podczas badań przedstawiono na Rys. 135 i Rys. 136. Wykres cyklicznego odkształcenia aproksymowano równaniem Ramberga-Osgooda (4). Na Rys. 135 przedstawiono przykładowe pętle histerezy z okresu trwałości n/N = 0,5 na ośmiu realizowanych poziomach odkształcenia ε_{ac} oraz wyniki opracowania parametrów pętli z tego okresu trwałości.



Rys. 135. Wykres cyklicznego i statycznego odkształcenia nałożony na pętle histerezy z okresu trwałości n/N = 0.5



Rys. 136. Porównanie wykresu statycznego odkształcenia do wykresów cyklicznego odkształcenia z różnych okresów trwałości

W celu zilustrowania wpływu przyjętego okresu trwałości na uzyskane charakterystyki na Rys. 136 przedstawiono wykresy cyklicznego odkształcenia uzyskane z wykorzystaniem danych z innych okresów trwałości. Wykresy cykliczne przecinają wykres statycznego rozciągania w obszarze odkształceń równych około $0,6\div0,7\%$. Dla odkształceń $\varepsilon < 0,7\%$ wykresy cyklicznego odkształcenia znajdują się poniżej wykresów statycznego rozciągania. Świadczy to o cyklicznym osłabieniu stali S355JR+N w tym obszarze odkształceń. Dla odkształceń $\varepsilon > 0,7\%$ wykresy cyklicznego odkształcenia znajdują się powyżej wykresów statycznego rozciągania, co świadczy o cyklicznym umocnieniu stali S55JR+N dla tego zakresu odkształceń. W przypadku badanej stali stosunek $1,2 < R_m/R_e = 1,25 < 1,4$. Biorąc pod uwagę powyższe kryterium można stwierdzić, że uzyskane w pracy wyniki w pełni je potwierdzają i wskazują na mieszane właściwości badanej stali. Analizując dane wyznaczono cykliczną granicę plastyczności, która dla badanego materiału wynosi 162 MPa, co stanowi jedynie 37% R_{eH} dla tego materiału.

Zmiany odkształceń ε_{ap} oraz ε_{ae} opisane równaniem Mansona-Coffina (11) w trakcie realizowanych prób (Rys. 129 i Rys. 131) oraz brak wyraźnego okresu stabilizacji powoduje, że położenie wykresu zmęczeniowego w sposób ścisły jest zależne od okresu trwałości zmęczeniowej n/N, z którego zostają pobrane parametry pętli histerezy wykorzystywane do jego wykonania. Na Rys. 137 przedstawiono wykresy zmęczeniowe uzyskane dla parametrów pętli histerezy z trzech różnych okresów trwałości zmęczeniowej. Na wykresie widoczne są również największe różnice uzyskanych wyników dla okresu trwałości n/N = 0,1.



Rys. 137. Wykres zmęczeniowy opisany równaniem Mansona-Coffina

3.5.5. Wyniki badania jakości złączy spawanych

Wyniki z badań przestawiono w formie protokołu z badań na Rys. 138. Wszystkie spoiny sklasyfikowano w kategorii B, co jest najwyższym poziomem jakości spoin.

VT		PROTOKÓŁ Z BADAŃ WIZULANYCH Visual Test Report Nr: 01/2016/VT/P1					
Data badania: Date of inspection:	04.12	.2015					
Próbki nr: K_1-K_10, Element №	X_1-X_	10, T_1	-T_10;				
Przepisy, normy, spec Regulations, norms, specific	yfikacje: ation:	PN-EN	13018, PN-EN ISO ISO 5817, PN-EN I	971 SO	12, PN EN ISO 17635, PN ISO 3058 6520, PN EN ISO 17637		
Kryteria odbioru: Acceptance criteria:	PN-EI 9606-	N ISO 5 -1	817, poziom jakośc	iВ	+ wymagania pkt. 7 wg PN EN ISO		
Metoda spawania: Welding method:	135	5 Ro	dzaj złączy: Docz nt type:	zoło	we (BW); Teowe (FW)		
Object: Próbki do be Object: wytrzymałoś	idań iciowych	Projec Projec	kt: S prawdzenie p t:	rób	ek przed próbami wytrzymałościowymi		
Przedmiot badań: Subject of inspection:	Złącza do Złącza kr	oczołow rzyżowe	e bw 10 mm - K_1 fw 7 mm X_1-X_10	-K_);	10; Złącza teowe fw 7 mm - T_1-T-10;		
Przygotowanie złącza Preparation the weld accord	zgodnie : ng to WPS	z WPS S №	nr: K_1-K_10 - 01/FW/201:	- 01 5, 1	1/BW/2015, X_1-X_10- C_1-T_10 - 02/FW/2015;		
Rodzaj badań: Type of inspection:	Ba Vis	adania sual testii	wizualne ^{ng}		VT		
Stosowane wyposażen Equipment used:	spoinomierz weld gauge A/32/014 suswmiarka slide caliper A/01/157 Equipment used: lupa mugnifying glass latarka halogenowa electric torch						
Warunki badania:	Oświet	lenie: n	aturalne + sztuczne	9	Wyposażenie: latarka halogenowa		
inspection conditions.	Kontro Control o	nation: trola oświetlenia: 648 [lx] rol of lighting:			Przyrząd: luksomierz ORION S/N:071000960 Instrument: nr ewidencyjny L/02/003		
Wynik badania: Result of inspection:	Poziom j	jakości	B wg PN EN ISO 5	817	I Quality level B acc PN EN ISO 5817		
Wytwórca: Manufacturer:							
Zakres badań: Scope of inspection:	100% 100%	złączy of weld	spawanych + SWO ed joints + HAZ	2			
Badania wykonal: Inspection performed by:	EK	Data, pieczęć i podpis:		NŽYNIER SPAWALNIK (MT2, PT2, RT2 VT2,)			
Nr certyfikatu: Certificate numer: VT2/7134/2013/0			Date, stamp and signature 04.12.2015		Howel Sell Mgr Int. Pawel Irek		

Rys. 138. Wyniki badania VT złączy spawanych

3.5.6. Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie mikropróbek pobranych ze spoiny doczołowej

Na Rys. 139 przedstawiono przykładowe próbki po próbie monotonicznego rozciągania natomiast w Tab. 28 zestawiono średnie parametry wytrzymałościowe mikropróbek z różnych obszarów złącza spawanego.



Rys. 139. Przykłady próbek po zrealizowaniu próby monotonicznego rozciągania

	R _m w MPa	A _{2,5} w %
Materiał rodzimy	614	39,9
SWC	673	46,4
Spoina	669	41,1

Tab. 28. Zestawienie średnich wyników dla badania mikropróbek

Przebiegi zmian naprężenia w funkcji odkształcenia zarejestrowane w trakcie prób monotonicznego rozciągania dla poszczególnych stref złącza spawanego i dla klasycznej próbki materiałowej przedstawiono na Rys. 140. Zauważyć należy, że przebieg wykresu statecznego rozciągania dla materiału rodzimego wykonany na mikropróbce ma zupełnie innych charakter i parametry wytrzymałościowe mają inne wartości niż wyznaczone na próbce klasycznej.



Rys. 140. Przebiegi zmian naprężenia w funkcji przemieszczenia w poszczególnych strefach złącza

Przeprowadzana analiza porównawcza wykresów rozciągania i parametrów wytrzymałościowych uzyskanych z wykorzystaniem mikropróbek pobranych z różnych złącza spawanego wykazała niewielkie różnice własności materiału we wszystkich strefach. Największą plastycznością i zarazem wytrzymałością charakteryzuje się materiał strefy wpływu ciepła, natomiast materiał rodzimy ma najniższą wytrzymałość i plastyczność rozumianą jako wydłużenie przy zerwaniu (Tab. 28). Jednakże różnice parametrów wytrzymałościowych dla próbek pobranych z różnych stref złącza spawanego nie przekraczają 8,8%. Świadczy to o bardzo dobrej jakości złącza i powtarzalnych właściwościach materiałowych występujących w strefach przejściowych pomimo występujących w nich różnicach w strukturze metalograficznej (Rys. 87b).

3.5.7. Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie próbek spawanych

Na Rys. 141 przedstawiono dwa charakterystyczne etapy rozciągania próbki: etap tworzenia się przewężenia na próbce (Rys. 141a) oraz rozdzielenie próbki kończące próbę statycznego rozciągania (Rys. 141b).



Rys. 141. Przebieg uszkodzenia próbki podczas prób statycznego rozciągania: a) tworzenie się przewężenia, b) powstanie pęknięcia - koniec próby

Uzyskane podczas badań statycznych przełomy poddano oględzinom. Nie stwierdzono występowania na przełomach wad ani wtrąceń. Wyniki prób statycznego rozciągania przedstawiono na Rys. 142 i Rys. 143 w formie wykresów rozciągania w układzie współrzędnych odkształcenie próbki ε i naprężenie σ . Naprężenie w próbce poddanej obciążeniu obliczano dzieląc zarejestrowane podczas próby chwilowe wartości siły obciążającej przez pole przekroju początkowego próbki.

Wykonane wykresy rozciągania poddano szczegółowej analizie mającej na celu wyznaczenie podstawowych parametrów wytrzymałościowych. Najważniejsze wyniki opracowania zestawiono w Tab. 29.



Rys. 142. Wykresy rozciągania próbek utwierdzonych podczas spawania



Rys. 143. Wykresy rozciągania próbek nieutwierdzonych podczas spawania

Oznaczenie	А	R _{p0,2}	R _m
próbki	%	MP	'a
SE01-Strain1	43,9	314	550
SE01-Strain2	3,8	436	330
SE02-Strain1	8,1	404	515
SE02-Strain2	13,7	401	545
SA01-Strain1	6,3	416	550
SA01-Strain2	23,2	394	559
SA02-Strain1	15,3	398	551
SA02-Strain2	7,2	379	554

Tab. 29. Zestawienie wyników badań wytrzymałościowych próbek spawanych

Analiza porównawcza uzyskanych wyników wskazuje na niewielkie różnice wytrzymałości na rozciąganie R_m dla próbek utwierdzonych podczas spawania oraz próbek swobodnych. Oznacza to, że elementy spawane, odkształcone, które ulegają znaczącemu naprężeniu wstępnemu (wyprostowaniu) nie powodują obniżenia swojej wytrzymałości na monotoniczne rozciągane. Widoczne są natomiast różnice w przypadku wydłużenia próbek. Przyczyną tego jest odkształcenie, które dla próbki, na której występuje karb geometryczny, nie jest jednorodne w jej długości i zależy ściśle od miejsca pomiaru. Z tego względu uzyskane wyniki odkształcenia próbek spawanych nie były analizowane.

3.5.8. Wyniki badania niskocyklowego próbek spawanych

Podobnie jak podczas badań niskocyklowych próbek jednorodnych, tak również podczas badań próbek spawanych obserwowano zmiany parametrów pętli histerezy w funkcji liczby cykli obciążenia. Odzwierciedleniem występujących zmian były między innymi zmiany kształtu pętli histerezy rejestrowanej w różnych okresach trwałości zmęczeniowej. Charakter obserwowanych zmian właściwości był zależny od poziomu odkształcenia ε_{ac} . W celu zilustrowania tego faktu na Rys. 144 przedstawiono przykładowe pętle histerezy uzyskane dla odkształcenia sterującego badaniem otrzymanego z ekstensometru 2 i dla odkształcenia wynikowego z ekstensometru 1. Wartości naprężeń chwilowych w próbce σ obliczano dzieląc wartość chwilowej siły obciążającej przez pole przekroju początkowego próbki poza spoina. Na rysunkach oznaczono numery cykli odpowiadających przedstawionym petlom histerezy. Na Rys. 144b widoczne jest przesuwanie petli histerezy w stronę przyrostu odkształcenia. Dzieje się tak, gdyż w strefie złącza spawanego dochodzi do powstawania cyklicznych odkształceń plastycznych z każdym kolejnym cyklem obciążenia. Zauważalne są zmiany naprężenia maksymalnego σ_{max} , jak również minimalnego σ_{min} wraz ze wzrostem liczby cykli obciążenia. Należy podkreślić, że najlepszym miejscem pomiaru odkształceń na próbce spawanej są okolice złącza spawanego. Jednakże ze względu na struktury i geometrii prawidłowe umiejscowienie ekstensometru, który steruje próbą odkształcenia złącza pociąga za sobą znaczące błędy pomiarowe. Widoczne są one w próbach sterowanych siła przedstawionych na Rys. 142 i Rys. 143 w postaci zróżnicowania przebiegu mierzonego odkształcenia z części gładkiej próbki (odkształcenie 2) i ze spoiny (odkształcenie1).

Analizując zebrane dane na Rys. 145 zestawiono przebiegi zmian amplitudy naprężenia σ_a oraz amplitudy odkształcenia plastycznego ε_{ap} w funkcji liczby cykli obciążenia uzyskane na 4 poziomach odkształcenia całkowitego ε_{ac} .

Przebiegi przedstawione na Rys. 145 potwierdzają zmiany parametrów kształtu pętli obserwowanych na Rys. 144. Na najniższym poziomie odkształcenia ($\varepsilon_{ac} = 0,1\%$) naprężenie σ_a ulega obniżeniu (Rys. 145) a



odkształcenie plastyczne ε_{ap} nieznacznie wzrasta. Powyższe świadczy o osłabieniu stali na tym poziomie.

Rys. 144. Pętle histerezy na poziomie 0,3 %: a) ekstensometr 2 – sterujący, b) ekstensometr 1 – pomiarowy

Na poziomach $\varepsilon_{ac} > 0,1\%$ naprężenie σ_a nieznacznie wzrasta, a odkształcenie ε_{ap} maleje, co oznacza umocnienie stali na tych poziomach. Procesy osłabienia, jak i umocnienia próbek spawanych ze stali S55JR+N widoczne są zarówno w opisie naprężeniowym (Rys. 145a), jak i odkształceniowym (Rys. 145b, c). Różnice w przebiegu ε_{ap} zauważalne na Rys. 145b i c są wynikiem powstawania pęknięcia w obrębie spoiny (SWC), dlatego wartość ε_{ap} mierzone na spoinie nie ulegają znaczącym zmianą na początku powstania pęknięcia w stosunku do ε_{ap} mierzonego na części gładkiej próbki. Ponadto przed zakończeniem każdej próby w momencie powstawania pęknięcia obserwuje się



wzrost σ_a , co jest spowodowane powstawaniem pęknięcia poza miejscem sterowania parametrem odkształcenia (odkształcenie ekstensometru 2).



W przebiegach zmian parametrów pętli histerezy dla próbek spawanych, podobnie jak dla próbek jednorodnych, można wyróżnić 3 charakterystyczne etapy:

dla *\varepsilon_{ac} = 0,1\%* wyróżnia się osłabienie, stabilizację i osłabienie do zniszczenia (Rys. 146a),



• dla $\varepsilon_{ac} > 0,1\%$ wyróżnia się osłabienie, stabilizacje i umocnienie do zniszczenia (Rys. 146b).

Rys. 146. Przebieg amplitudy naprężenia dla spawanej próbki: a) odkształcanej o 0,1%, b) odkształcanej o 0,5%

Szczegółowa analiza wykresów pokazanych na Rys. 145 i Rys. 146 pozwala stwierdzić, że poziom odkształcenia ε_{ac} wpływa również na wielkość zmian właściwości cyklicznych (osłabienia lub umocnienia) podczas próby zmęczeniowej. Do oceny wpływu poziomu odkształcenia na zmiany podstawowych parametrów pętli wprowadzono współczynnik zmian właściwości cyklicznych $\Delta \sigma_{wzgl}$ (19).

Zmiany kształtu pętli oraz jej parametrów obserwowano na wszystkich poziomach odkształcenia. Świadczy to o zmianach właściwości cyklicznych badanych próbek spawanych w trakcie zadawania obciążenia zmiennego. Przebieg zmiany amplitudy naprężenia σ_a w funkcji liczby cykli przedstawiono na Rys. 144 i Rys. 146.
Zmiany naprężenia σ_a w liczbie cykli N dla skrajnych poziomów odkształcenia sterującego przedstawiono na Rys. 146.

3.5.9. Wyniki badań odkształceń pospawalniczych w węźle konstrukcyjnym oraz pomiar wpływu bliskości SWC na wytrzymałość blachy głównej w tym samym węźle

Badania naprężeń pospawalniczych

Wyniki pomiarów odkształceń i obliczeń naprężeń pospawalniczych w wybranych obszarach węzła spawanego (T1 i T2 -Rys. 103) przedstawiono na Rys. 147 i Rys. 148. Zaprezentowane wyniki opierają się na liniowosprężystym modelu materiału. Wyniki badań o wartościach największych dodatnich zostały zaznaczone na żółto na poniższych rysunkach.



Rys. 147. Naprężenia pospawalnicze wyznaczone w próbce niepoddanej procesowi wibroodprężania; σ_y , σ_x - naprężenia normalne, T_{xy} - naprężenia styczne, σ_{max} , σ_{min} - naprężenia maksymalne i minimalne



Rys. 148. Naprężenia po spawalnicze wyznaczone w próbce poddanej procesowi wibroodprężania; σ_{y} , σ_{x} - naprężenia normalne, T_{xy} - naprężenia styczne, σ_{max} , σ_{min} - naprężenia maksymalne i minimalne

Ze względu na usytuowanie miejsca pomiaru względem samej spoiny dominujące są w złączu naprężenia normalne. Wartość zadanych odkształceń przekracza zakres liniowo-spreżystego zachowania sie materiału i z tego powodu wartości naprężeń σmin odpowiadają odkształceniom przekraczającym wartość granicy plastyczności. Porównując wartości i zwroty naprężeń dla próbki odprężonej i nieodprężonej widać, że proces odprężania wibracyjnego nie usuwa wszystkich naprężeń z próbki. Powoduje jednak prawie trzykrotnie obniżenie poziomu maksymalnych naprężeń normalnych dodatnich, co może znacząco wpływać na wzrost trwałości zmęczeniowej wezła spawanego. Zwroty naprężeń zmieniły się z ujemnych na dodatnie dla σ_x , σ_y i τ_{xy} . Należy pamiętać, iż wyznaczone wartości i wnioski odnoszą się do analizowanego węzła.

Badania twardości SWC

Na Rys. 149 przedstawiono przebieg zmian twardości względem położenia miejsc pomiaru na długości obiektu konstrukcyjnego. Przebieg ten jest zależny od miejsca występowania spoiny. Na Rys. 150 widoczne są przekroje próbek z widocznymi strefami wpływu ciepła wywołanymi kolejnymi cyklami cieplnymi.

Na każdej próbce wykonano po 7 pomiarów twardości. Dwa skrajne wyniki pomiarów twardości odrzucono. Z pozostałych 5 wyników wyznaczono wartość średnią oraz określono odchylenie standardowe. Wyniki charakteryzują się dużym rozrzutem i małą powtarzalnością. Spadek twardości dla próbki S7 jest wywołany lokalnie poprzez wykonanie spoin po obu stronach blachy głównej. Usytuowanie spoin w tym samym miejscu po obu stronach blachy spowodowało w danym punkcie dwukrotnie większy strumień dostarczonej energii cieplnej do materiału, co wywołało niekontrolowane zmiany własności mechanicznych.



Rys. 149. Twardość HV na długości węzła konstrukcyjnego

Wyniki pomiaru twardości nie mają bezpośredniego przełożenia na wyniki z próby statycznego rozciągania, gdyż zmiany strukturalne wywołane cyklami cieplnymi nie miały na tyle dużego zasięgu, aby wpłynąć na pełen przekrój poprzeczny próbek, a jedynie na ich górną i dolną część. Widoczne jest to na zdjęciach makroskopowych próbek S7 i S8 na rysunku Rys. 150.



Rys. 150. Zdjęcia makroskopowe stref wpływu ciepła

Badanie wytrzymałości na rozciąganie

W celu weryfikacji poprawności wykonania spoiny wykonano zgład przykładowego złącza. Na Rys. 151 przedstawiono makrostrukturę spoiny z zaznaczonymi poszczególnymi przejściami ściegu spawalniczego. Struktura złącza w bezpośredni sposób wpływa na wytrzymałość próbek wiosełkowych pobranych z węzła konstrukcyjnego.



Rys. 151. Makrografia spoiny pachwinowej

Wyniki prób monotonicznego rozciągania przedstawiono na Rys. 152 w postaci wykresów rozciągania w układzie współrzędnych naprężenie odkształcenie. Naprężenie w próbce poddawanej obciążeniu obliczano dzieląc chwilową wartość siły obciążającej przez pole przekroju początkowego próbki.



Rys. 152. Wykresy rozciągania próbek S6-S11 i SR12

Na podstawie przedstawionych wykresów (Rys. 153) można stwierdzić, że badane próbki charakteryzują się znacznym zróżnicowaniem parametrów wytrzymałościowych. Jak należało oczekiwać wartości parametrów R_m , $R_{p0,2}$ oraz A_{50} w sposób ścisły zależą od położenia próbki w stosunku do spoin wykonanych w procesie technologicznym produkcji węzła. W celu porównania występujących różnic w pracy dokonano obliczeń wielkości zmian analizowanych parametrów w stosunku do wyników uzyskanych dla próbki referencyjnej. Wielkość zmiany wytrzymałości na rozciąganie obliczano ze wzoru opisanego poniżej.

$$\delta_{Rm} = \left(\frac{R_{m(R)} - R_{m(i)}}{R_{m(R)}}\right) \cdot 100\% \tag{20}$$

W analogiczny sposób obliczano wartości $R_{p0,2}$ oraz A. Uzyskane wyniki zestawiono w Tab. 30.

Największe zmiany wytrzymałości na rozciąganie (R_m) w stosunku to próbki referencyjnej (SR12) obserwowano w przypadku próbki S7, gdzie wzrost wytrzymałości wyniósł około 7%. Z kolei dla wydłużenia przy zerwaniu (A_{50}) największą różnicę w stosunku do próbki SR12 obserwowano dla próbki ze strefy S9 (obniżenie około 42%). W przypadku umownej granicy plastyczności ($R_{p0,2}$) wzrost maksymalny dotyczy próbek S10 i S5 i wynosi około 20%. Zmiany analizowanych parametrów dotyczą próbek pobranych z obszarów węzła posiadającego znaczące zagęszczenie spoin, co skutkuje tym, że każda próbka posiadała co najmniej jedną SWC.



Rys. 153. Wyniki opracowania prób wytrzymałościowych: Rm, Rp0,2, A50

Ormorraio	Różnica procentowa			
Oznaczenie	ΔR_m	ΔA	$\Delta R_{p0,2}$	
S1-	-0,1	1,1	0,3	
S2-	0,3	-0,9	0,10	
S3-	1,1	-3,0	0,0	
S4-	2,10	-11,10	6,7	
S5-	6,7	-22,7	20,2	
S6-	3,2	-9,10	12,4	
S7-	7,10	-42,0	19,1	
S8-	7,6	-310,7	20,10	
S9-	4,9	-42,7	12,9	
S10-	2,5	-210,5	10,1	
S11-	-0,1	-6,1	-1,4	
Maksymalna różnica procentowa	7,10	-42,7	20,10	

Tab. 30. Różnice pomiędzy uzyskanymi wynikami dla próbek pobranych z węzła

3.5.10. Wyniki badania spiętrzenia naprężeń wywołanego karbem geometrycznym jakim jest złącze spawane – "Hot Spot"

Wyniki zarejestrowanych podczas badań odkształceń na 3 poziomach ε_{ac} równego 0,05%, 0,1% oraz 0,15% przedstawiono na Rys. 154 - Rys. 156.

Analiza wyników wykazała, że odkształcenia mierzone w punktach naklejenia tensometrów nie są symetryczne, a ich dominujący zwrot jest ujemny. Jest to przyczyną przesuwania się pętli histerezy dla materiału SWC (Rys. 157). Na Rys. 158 przedstawiono interpretację graficzną rozkładu odkształceń w przekroju poprzecznym. Rysunek ten bardzo dobrze obrazuje nierównomierny rozkład odkształceń w zależności od miejsca pomiaru (lico, grań, przekrój poprzeczny). Taki rozkład jest spowodowany poprzez niesymetryczny przekrój porzeczny próbki, który jest spowodowany obecnością spoiny, ponadto wpływ na taki rozkład naprężeń ma niesymetryczny rozkład SWC po grubości blachy. W Tab. 31 przedstawiono zestawienie odkształceń maksymalnych i minimalnych dla punktów pomiarowych od 1 do 7 będących najbliżej spoiny.



Rys. 154. Przebieg odkształceń dla odkształcenia sterującego $\varepsilon_{ac} = 0.05\%$



Rys. 155. Przebieg odkształceń dla odkształcenia sterującego $\boldsymbol{\varepsilon}_{ac} = 0,1\%$



Rys. 156. Przebieg odkształceń dla odkształcenia sterującego $\varepsilon_{ac} = 0,15\%$



Okształcenie w µm/m

Rys. 157. Pętle histerezy dla odkształcenia $\varepsilon_{ac} = 0,1\%$ z pomiaru dla tensometru nr 5



Rys. 158. Rozkład odkształceń maksymalnych w geometrii spoiny przy odkształceniu sterującym $\varepsilon_{ac} = 0,1\%$ dla pierwszego cyklu obciążenia

Odkształcenie ε_{max} w μ m/m								
$\varepsilon_{ac} \le \%$	Tens 1	Tens 2	Tens 3	Tens 4	Tens 5	Tens 6	Tens 7	Tens 8
0,05	4105	500	554	3104	746	554	546	201
0,1	1046	1077	10010	4107	12104	916	931	355
0,15	1231	1261	1654	1020	2301	1393	1346	619
Odkształcenie ε_{min} w μ m/m								
$\mathcal{E}_{ac} \le \%$	Tens 1	Tens 2	Tens 3	Tens 4	Tens 5	Tens 6	Tens 7	Tens 8
-0,05	-469	-492	-561	-410	-769	-569	-554	-410
-0,1	-931	-9105	-1192	-703	-1946	-1154	-1077	-703
-0,15	-1169	-1292	-1523	-1056	-2354	-1385	-1331	-856

Tab. 31. Wyniki pomiarów odkształceń w punktach tensometrycznych

Na Rys. 159 przedstawiono porównanie wielkości zakresu odkształcenia sterującego ($\Delta \varepsilon$) do podwojonej amplitudy odkształcenia rejestrowanego przez tensometry umieszczane w punkcie 5. W tym punkcie tensometry rejestrowały największe wartości odkształcenia. Średnia wartość stosunku ε_{ac} do ε_{Tens5} to 0,710. Na Rys. 160 przedstawiono widok przykładowej próbki po badaniu.



Rys. 159. Przebieg zależności pomiędzy odkształceniem sterującym a odkształceniem dla tensometru nr 5



Rys. 160. Postaci uszkodzenia przykładowej próbki

Przeprowadzone pomiary odkształcenia w punktach tensometrycznym "Tens 4" i "Tens 8" przedstawiono w Tab. 32. Zawarto w niej również wyliczone wartości naprężenia.

E _{ac} W %	Tens 4 w μm/m	Tens 8 w μm/m	Naprężenie obliczone z prawa Hooke'a dla Tens 4 w MPa	Naprężenie obliczone z prawa Hooke'a dla Tens 8 w MPa				
Max								
0,05	384	201	99	188				
0,1	487	355	174	239				
0,15	820	619	304	402				
Min								
-0,05	-410	-207	-102	-201				
-0,1	-703	-495	-243	-345				
-0,15	-856	-588	-288	-420				

Tab. 32. Pomiary odkształcenia i obliczenia naprężenia w "Tens 4" i "Tens 8"

Opierając się na metodzie opisanej w [102] obliczono naprężenia "Hot Spot" korzystając z równania

$$\sigma_{hs} = (1,67 \text{ Tens} 4 - 0,67 \text{ Tens} 8)\text{E}$$
 (21)

Obliczenia przeprowadzono dla założenia, że tensometry znajdują się w odległości 0,4 i 1,0 grubości blachy od spoiny. Wyniki obliczeń przedstawiono w Tab. 33. Analiza uzyskanych wyników wykazała prawie 2,5-krotny wzrost naprężenia wyliczonego metoda "Hot Spot" w stosunku do naprężenia nominalnego.

Tab. 33. Wyniki obliczeń naprężenia "Hot Spot"

0 W	Naprężenie	Naprężenie	Gradient naprężeń				
m/m	nominalne σ_n w	"Hot Spot" σ_{lok} w	w punkcie "Hot Spot"				
	MPa	MPa					
Max							
0,05	110	247	225 %				
0,1	192	280	146 %				
0,15	267	465	174 %				
Średnia	189,6	280,3					
Min							
-0,05	-110	-267	242 %				
-0,1	-209	-410	197 %				
-0,15	-270	-505	187 %				

3.5.11. Wyniki badania spawanego węzła konstrukcyjnego

Badania zakończono po zrealizowaniu 107 cykli. Czas trwania tego badania to około 30 dni. Przykładowy przebieg odkształceń zarejestrowanych z wykorzystaniem tensometrii oporowej przedstawiono na Rys. 161. W celu ograniczenia ilości analiz wykorzystano dane pochodzące nie ze wszystkich 120 tensometrów pomiarowych, a jedynie z 6, na których zarejestrowano największe wartości odkształceń. Wyniki pomiarów odkształcenia przeliczone na wartości naprężenia z poszczególnych bloków i poziomów obciążenia przedstawiono na Rys. 162. Analiza uzyskanych wyników wykazuje zmianę wartości amplitudy i wartości średniej naprężenia w miarę narastania liczby cykli obciążenia. Świadczy to o zmianach zachodzących w materiale na skutek oddziaływania zmiennego obciążenia. Zmiany te nie mają jednakowego charakteru dla wszystkich punktów tensometrycznych. Jest to spowodowane zróżnicowanym umiejscowieniem tensometrów, zróżnicowanym stopniem i charakterem ich obciążenia zależnym od geometrii oraz sztywności badanego węzła w danym punkcie pomiarowym. Zróżnicowany stopień wytężenia fragmentów badanej struktury jest powodem uzyskania różnych poziomów trwałości obliczeniowej.



Rys. 161. Przebieg odkształcenia od 1 cyklu

Po badaniu przeprowadzono badania magneto-proszkowe, które nie wykazały wystąpienia pęknięć w badanej strukturze.





Rys. 162. Wyniki obliczonych naprężenia przedstawionego jako średni wynik z pojedynczego bloku, próbkowane co 50 tysięcy cykli. Wyniki dla punktów tensometrycznych: a) 202, b) 205, c) 206, d) 207, e) 214, f) 216

3.5.12. Wyniki badania próbki wielkogabarytowej ramy wózka tramwajowego

Po realizacji pełnego procesu badawczego, który obejmował 10⁷ cykli obciążenia przeprowadzono badanie magneto-proszkowe które nie wykazało wystąpienia pęknięcia w strukturze badanego *Zespołu*. Przykładowy przebieg odkształceń zarejestrowanych z wykorzystaniem tensometrii oporowej przedstawiono na Rys. 163. W celu ograniczenia ilości analiz wykorzystano dane z 6 tensometrów, na których zarejestrowano największe wartości odkształceń. Wybrane punkty pomiarowe były zbieżne z punktami pomiarowymi z badania próbki niższego rzędu (Rozdział 3.5.11). Wyniki pomiarów z poszczególnych bloków i poziomów obciążenia przedstawiono na Rys. 164.



Rys. 163. Przebieg odkształcenia od 10 cyklu podczas badania ramy





Rys. 164. Wyniki przeliczenia naprężenia przedstawionego jako średni wynik z pojedynczego bloku, próbkowane co 50 tysięcy cykli. Wyniki dla punktów tensometrycznych: a) 202, b) 205, c) 206, d) 207, e) 214, f) 216

Analiza uzyskanych wyników badań uwidacznia zmiany naprężenia średniego w okresie od początku realizacji badania do ok. 1,5 mln cykli obciążenia. Po tym okresie następuje stabilizacja mierzonych wartości, tak jak można to zauważyć na Rys. 164a, b, c. Jednakże złożoność geometryczna struktury i interakcji pomiędzy jej poszczególnymi elementami uniemożliwia uzyskanie takiego samego charakteru odpowiedzi materiały na obciążenie w każdym punkcie tensometrycznym. Potwierdza to wynik uzyskany dla tensometru 207 (Rys. 164d), dla którego wartość naprężenia średniego ulega ciągłej zmianie i nie można wyznaczyć okresu stabilizacji. Świadczy to o niejednakowym wytężeniu konstrukcji, co może być wynikiem przewymiarowania niektórych jej fragmentów, a w rezultacie daje to inny poziom trwałości zmęczeniowej dla każdego fragmentu badanego obiektu. Ocena uzyskanych różnic może być wykładnią stopnia optymalizacji konstrukcji pod względem uzyskania jednakowej trwałości zmęczeniowej dla całej struktury.

3.6. ANALIZA WYNIKÓW

Badania został poprzedzone analizami mającymi na celu dekompozycję *Produktu* końcowego na *Zespoły, Podzespoły, Elementy* i *Próbki* najniższego rzędu. Dzięki temu podejściu można było rozpocząć proces badawczy od próbek o najprostszej geometrii i przekładać ich wyniki na obiekty o większym stopniu złożoności, które to były badane w następnej kolejności.

Prace rozpoczęto od przeprowadzenia badań podstawowych, które miały na celu wyznaczenie własności wytrzymałościowych istotnych na początkowym etapie prowadzonych analiz opartych o MES. Następnie przeprowadzone zostały badania obejmujące swym zakresem analizy prostych węzłów spawanych, analizy średniego rozmiaru obiektów badawczych i na końcu przeprowadzono badanie na próbce wielkogabarytowej.

Ze względu na niedoprowadzenie do zniszczenia próbek *Zespołu* i *Podzespołu* zaproponowano metodykę umożliwiająca przeprowadzenie analiz uzyskanych wyników przy załażeniu projektowej trwałości *Produktu* 10 mln cykli obciążenia składającego się z bloków obciążenia zgodnych z Tab. 3,Tab. 4, Rys. 115 iRys. 119. 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.

Na Rys. 165 pokazano przyjętą metodykę odkształceniowego podejścia do szacowania trwałości zmęczeniowej złożonych struktur spawanych w której istotne jest określenie odkształcenia materiału wywołanego spiętrzeniem naprężeń w karbie jakim jest złącze spawane. Jej stosowanie jest oparte na następujących etapach:

- analiza obciążeń zewnętrznych działających na Produkt,
- analiza obciążeń pospawalniczych,
- wybór krytycznych miejsc / karbów,
- obliczanie spiętrzania naprężenia karbie,
- określenie odpowiedzi sprężysto-plastycznej w karbie,
- wyodrębnienie cykli reprezentowanych przez zamknięte pętle histerezy naprężenie-odkształcenie,

- obliczenie wielkości pojedynczych uszkodzeń zmęczeniowych dla poszczególnych karbów,
- sumowanie uszkodzeń zmęczeniowych,



Rys. 165. Schemat przyjętej metody obliczeniowej stopnia uszkodzenia D

Zgodnie z przyjęta metodyka oprócz opisu zmiany odkształceń ε_{ac} , ε_{ac} w liczbie cykli dla materiału z jakiego wykonane są obiekty badań (3.5.4) potrzebny jest opis spiętrzenia naprężeń występujących w karbie. W powszechnym użyciu występuje kilkanaście metod wyznaczania stopnia spiętrzenia naprężeń. Jedną z najbardziej popularnych jest metoda oparta o współczynnik kształtu karbu Neuber'a. Metoda ta uzależnia wartość naprężenia lokalnego w karbie od nominalnego poprzez współczynnik spiętrzenia odkształceń i współczynnik spiętrzenia naprężeń, jak to przedstawiono w równaniu (8). Na potrzeby realizowanych analiz równanie Neuber'a zostało uzupełnione o zebrane dane z badań próbek wiosełkowych ze spoiną (3.5.5), próbek gładkich (3.5.4) i "Hot Spot" (3.5.10). Równanie Neuber'a składa się dwóch równań opisujących spiętrzenie naprężeń K_{σ} i odkształceń K_{ε} . Sposób ich wyznaczenia przedstawiono poniżej.

Współczynnik spiętrzenia naprężeń wyznaczono korzystając z uśrednionych wyników analizy "Hot Spot" (Tab. 33) jedynie dla obciążeń dodatnich będących główną przyczyną niszczenia konstrukcji spawanych. Gdzie za naprężenia lokalne przyjęto średnia wartość wyznaczonych naprężeń "Hot Spot" $\sigma_{lok} = 330,8$ MPa a za naprężenia normalne przyjęto średnia wartość naprężeń wykorzystywanych do zadawania obciazenia w analizach "Hot Spot" $\sigma_n = 189,6$ MPa.

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{lok}}{\sigma_n} = 1,82 \tag{22}$$

Chcąc uwzględnić zmiany właściwości materiału w czasie, współczynnik spiętrzenia odkształceń budowano poprzez zestawianie ze sobą charakterystyki trwałości niskocyklowej badanych próbek gładkich i próbek spawanych. Na Rys. 166 przedstawiono sposób wyznaczenia funkcji współczynnika $K_{\varepsilon N}$ będącej współczynnikiem spiętrzenia odkształceń **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**), zależnym od liczby cykli obciążenia próbek gładkich i spawanych, liczonym dla odkształceń wybieranych z tych samych poziomów liczby cykli obciazenia N_i . Wykorzystano wyniki badań próbek gładkich i próbek ze spoiną opisane w rozdziałach 3.5.5 i 3.5.4.

$$K_{\varepsilon-N} = \frac{\varepsilon_{\text{lok-Ni}}}{\varepsilon_{n-Ni}}$$
(23)



Rys. 166. Schemat wyznaczania funkcji opisującej współczynnik spiętrzenia odkształceń

Dodatkowo w celu porównania uzyskanych wyników wyznaczono wartość średnią współczynnika spiętrzenia odkształceń $K_{e,sr}$ o wartości niezmiennej w funkcji liczby cykli obciążenia (24). W celu wyznaczenia tego współczynnika

przyjęto taką samą ilość realizowanych cykli obciążenia jak dla projektowej trwałości *Produktu* opisanej w Rozdziałach 3.4.11 oraz 3.4.12, N = 10 mln cykli.

$$K_{\varepsilon-\acute{s}r} = \frac{\int_0^N K_{\varepsilon-n}}{N} = 4,62 \tag{24}$$

Graficznie porównano przebiegu $K_{\varepsilon \cdot Sr}$ i $K_{\varepsilon \cdot Sr}$ przedstawiono na Rys. 167. Stwierdza się, że w celu ułatwienia obliczeń można stosować $K_{\varepsilon \cdot Sr}$, jednakże należy mieć na uwadze fakt, że zostało ono wyznaczone dla cykli obciążenia o amplitudzie niezmiennej w czasie. Dlatego też w celu uzyskania możliwie wysokiej jakość prowadzonych analiz zaleca się używać współczynnika uzależnionego od liczby cykli $K_{\varepsilon \cdot n}$.



Rys. 167. Zmiana współczynnika spiętrzenia odkształceń K $_{\epsilon}$ w zależności od liczby cykli

W kolejnym etapie analiz wyznaczono wartość współczynnika kształtu karbu K_{t-sr} o wartości nieuzależnionej od liczby cykli (25).

$$K_{t-\acute{s}r}^2 = K_\sigma \cdot K_{\varepsilon-\acute{s}r} = 2,895 \tag{25}$$

W przedstawionym rozważaniu współczynnik kształtu wg Neuber'a opiera się na współczynniku spiętrzenia naprężeń wyznaczonym na podstawie metody "Hot Spot" i na współczynniku spiętrzenia odkształceń bazującym na odkształceniach dla próbek gładkich i dla próbek ze spoiną. Mimo znacznego ułatwienia analiz opartych o $K_{t-\hat{s}r}$ mającego stałą wartość w przedziale do N = 10mln 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

$$K_{t-n}^2 = 1,82 \cdot 10^{0,091 \log N + \log 1,1532}$$
⁽²⁶⁾

Porównanie graficzne współczynników K_t i K_{t-sr} zostało przedstawione na Rys. 168.



Rys. 168. Zmiana współczynnika kształtu karbu Kt w liczbie cykli

Wyniki badań węzła spawanego (*Podzespołu*) i wielkogabarytowej ramy tramwajowej (*Zespołu*) opisane w Rozdziałach 3.4.11 i 3.4.12 opracowano wykorzystując hipotezę sumowania uszkodzeń (12). Stopień uszkodzenia był *D* wyznaczany został na podstawie trzech modeli obliczeniowych. Najprostszym jest: model Mansona-Coffina przedstawiona za pomocą równania (11) oraz dwa modele uwzględniające naprężenia średnie - model Morrow'a (14) i model Mansona-Halforda (15). W prowadzonych analizach dla wszystkich modeli obliczeniowych uwzględniano:

- zmienny współczynnik kształtu Neuber'a zależny od stopnia uszkodzenia, opisany zależnością (26),
- naprężenia średniego oraz poziom amplitudy odkształcenia wyznaczone w trakcie badań laboratoryjnych na poziomie dekompozycji Zespołu i Podzespołu – Rozdziały 3.4.11 i 3.4.12,
- poziom naprężeń pospawalniczych opisany w Rozdziale 3.5.10; analizy przeprowadzono dla trzech poziomów: σ_r = σ_m = 0 MPa (brak naprężeń), 32 MPa (naprężenia po wibroodprężaniu), 84 MPa (naprężenia pospawalnicze maksymalne),
- parametry pętli histerezy materiału wyznaczano na podstawie modelu Ramberga-Osgooda (4) dla *n/N*=0,5,
- dane materiałowe wyznaczone w Rozdziale 3.5.

W celu porównania wyniki stopnia uszkodzenia ograniczone jedynie do modelu Mason-Coffina przedstawiono w formie graficznej na Rys. 169 i Rys. 170. Uzyskane maksymalne wartości wyników wahają się od ok. 2,08 (Rys. 169) dla *Podzespołu* i 2,56 (Rys. 170) dla próbki ramy z poziomu dekompozycji *Zespołu*. Porównanie uzyskanych wyników obrazuje wpływ charakteru obciążenia i zastosowanego modelu na uzyskany wynik, na co ma wpływ przede wszystkim uwzględniony poziom naprężenia średniego.



Rys. 169. Porównanie stopnia uszkodzenia dla 10⁷ cykli obciążenia próbki węzła dla czujników tensometrycznych: 202, 207, 205, 216, 206, 214



Rys. 170. Porównanie stopnia uszkodzenia dla 10⁷ cykli obciążenia próbki ramy dla punktów pomiarowych: 202, 207, 205, 224, 206, 214

Średni stopień uszkodzenia D_{sr} wyliczono w oparciu o średnią arytmetyczną dla wszystkich analizowanych punktów pomiarowych przedstawiono w Tab. 34. Stwierdzić można, że dla wszystkich trzech modeli uzyskane wyniki są porównywalne, a różnice pomiędzy uzyskanymi wynikami dla próbki *Podzespołu* i *Zespołu* zwiększają się znacząco wraz ze zwiększaniem poziomu naprężeń szczątkowych (pospawalniczych) i osiągają nawet 32 % (Tab. 34) według modelu Massona-Coffina i naprężenia średniego 84 MPa. 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. Różnica pomiędzy najwyższym a najniższym wynikiem (Tab. 34, 126,2 / 123,1 %) wynosi ok. 4% średniego stopnia uszkodzenia. Największy stopień uszkodzenia zaobserwować można dla opisu według modelu Mason-Coffin'a dla obu rodzajów próbek.

Napreżenia	Model	Stopień uszkodzenia D_{sr} (N = 10 ⁷ cykli)					
średnie σ_m	obliczeniowy	Podzespół	Zespół	Podzespół	Zespół	Podzespół	Zespół
w MPa	Tens. nr.	202		207		205	
0	Mason- Coffin	0,025	0,091	0,004	0,056	0,012	0,056
32	Morrow	0,018	0,028	0,008	0,022	0,006	0,022
84	Manson- Halford	0,050	0,095	0,004	0,050	0,012	0,050
		Podzespół	Zespół	Podzespół	Zespół	Podzespół	Zespół
	Tens. nr.	202		207		205	
0	Mason- Coffin	0,193	0,382	0,052	0,335	0,125	0,335
32	Morrow	0,108	0,134	0,102	0,142	0,067	0,142
84	Manson- Halford	0,246	0,467	0,054	0,272	0,116	0,272
		Podzespół	Zespół	Podzespół	Zespół	Podzespół	Zespół
	Tens. nr.	202		207		205	
0	Mason- Coffin	2,088	2,376	0,982	2,565	1,715	2,565
32	Morrow	1,339	1,072	1,752	1,249	1,001	1,249
84	Manson- Halford	2,171	1,706	1,107	1,800	1,447	1,800

Tab. 34. Wyniki stopnia uszkodzenia D dla 10 mln cykli obciążenia

Wyniki badań próbek opisane w Rozdziale 3.4.11 i 3.4.12 były zrealizowane dla próbek poddanych wibroodprężaniu, z tego powodu najważniejszymi wynikami analiz są wyniki dla wartości σ_m 32 MPa (Rys. 171b, e, h). Pozostałe wyniki przedstawione na Rys. 171 są jedynie hipotetycznymi wynikami, służącymi jako punkt odniesienia, dla których to stopień uszkodzenia przy 10 mln cykli obciążenia dochodzi nawet do D = 2 (Rys. 171c, e, f, g) dla punktu pomiarowego 202, 205 i 214. Świadczy to o tym, że gdyby obiekty badawcze nie były poddane zabiegowi wibroodprężania, to *Produkt* nie uzyskałby zakładanej trwałości projektowej. Jak również informuje nas o tym, że gdyby zredukować wartość naprężeń pospawalniczych wartości bliskiej zeru to stopień uszkodzenia po zrealizowaniu 10 mln cykli obciążenia mógłby zmaleć do około D > 0,1 (Rys. 171a, g) dla punktu pomiarowego 202.

Uzyskane wyniki analiz dla σ_m 32 MPa dla wszystkich trzech modeli obliczeniowych pokazują, że przebadana na stanowisku laboratoryjnym rzeczywista próbka węzła spawanego (*Podzespołu*) uległa uszkodzeniu w stopniu od 8,7% do 9,5%, a próbka ramy spawanej (*Zespołu*) od 13,6% do 19% (Tab. 34). Świadczy to przewymiarowaniu całego *Produktu* i o zadowalającej zbieżności dla wyników *Podzespołu* i *Zespołu*.



Rys. 171. Zestawienie uzyskanych wyników stopnia uszkodzenia dla wybranych punktów pomiarowych w oparciu o próbki dla dwóch stopni dekompozycji

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W ramach w pracy doktorskiej zrealizowany został bardzo szeroki program badań zmeczeniowych W zróżnicowanych warunkach obciażenia 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 wzgledów uzyskane wyniki i bardzo bogata baza nośnikach cyfrowych zarejestrowanych na wyników długotrwałych i kosztochłonnych 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 wózków ram 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.

Przeprowadzone badania umożliwiły sformułowanie szeregu szczegółowych wniosków dotyczących problematyki podjętej w pracy doktorskiej.

4.1. WNIOSKI

Analiza uzyskanych w pracy wyników badań pozwala sformułować szereg wniosków, z których najważniejsze to:

- 1. W warunkach obciążeń stałoamplitudowych w przypadku stali 355J2+N mają miejsce zmiany właściwości cyklicznych, które utrudniają jednoznaczne określenie tzw. okresu stabilizacji na poszczególnych poziomach odkształcenia. Wartości danych materiałowych zależą od okresu trwałości zmęczeniowej przyjętego do ich wyznaczenia. Przyjęcie ich z okresu odpowiadającego połowie trwałości zmęczeniowej (n/N = 0,5) powoduje, że odzwierciedlają one jedynie chwilowe właściwości cykliczne tych materiałów z tego okresu trwałości. Powyższe powoduje, że wpływ na wyniki obliczeń trwałości oraz symulacji komputerowych ma zarówno sam przebieg zmian właściwości cyklicznych, jak również okres trwałości przyjęty do określenia niezbędnych danych materiałowych.
- 2. Brak okresu stabilizacji właściwości cyklicznych podczas obciążenia zmęczeniowego stałoamplitudowego powoduje, że wątpliwości budzą wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej, jak również wyniki symulacji przeprowadzonych metoda elementów skończonych, które bazują na niezmiennych danych materiałowych określonych podczas badań w warunkach obciążeń stałoamplitudowych.
- 3. Skutkiem zmian parametrów pętli histerezy obserwowanych podczas analizy wyników badań niskocyklowych są zmiany danych materiałowych wykorzystywanych podczas obliczeń trwałości, które z kolei określane są w warunkach obciążeń stałoamplitudowych. Dane materiałowe (n' i K') zależą w sposób istotny od okresu trwałości, dla którego zostają określone.
- 4. Rozwój metod numerycznych i zastosowanie zaawansowanych narzędzi obliczeniowych pozwala obecnie projektantom w dużym zakresie ograniczać bardzo kosztowne badania eksperymentalne gotowych obiektów. Dotyczy to jednak głównie obiektów nieskomplikowanych, w miarę "bezpiecznych" w trakcie eksploatacji z punktu widzenia użytkownika. Należy jednak podkreślić, że wiarygodność uzyskanych wyników obliczeń numerycznych zależy w dużej mierze od jakości danych materiałowych uzyskiwanych podczas badań eksperymentalnych.
- 5. Analiza doniesień literaturowych wskazuje, że w przypadku złożonych i odpowiedzialnych wyrobów badania laboratoryjne całych konstrukcji w skali naturalnej są w dalszym ciągu jedynym wiarygodnym źródłem informacji o poprawności przyjętych założeń konstrukcyjnych. Wyniki tych badań są również niejednokrotnie podstawą dopuszczenia projektowanych obiektów do eksploatacji. Najczęściej takie badania prowadzi się w fazie prototypu, który na podstawie uzyskanych w trakcie badań wyników poddaje

się wielu modyfikacjom i poprawkom aż do uzyskania zadowalających wyników.

- 6. W przypadku niektórych obiektów technicznych, ze względów ekonomicznych, nie występuje w procesie projektowo-konstrukcyjnym "prototyp obiektu", a pierwszy wykonany w skali naturalnej jest obiektem przeznaczonym do sprzedaży. Do takich obiektów należa miedzy innymi złożone struktury, takie jak statki morskie, samoloty, maszyny robocze, szynowe. Dla zapewnienia najwyższej pojazdy niezawodności i bezpieczeństwa projektowanych obiektów oraz uniknięcia błędów, ich badania w skali 1:1 sa zastepowane badaniami na modelach w odpowiedniej skali lub badaniami specjalnie preparowanych węzłów. Tak dzieje się podczas procesu projektowo-konstrukcyjnego np. statków morskich. Prowadzone badania wytrzymałościowe oraz zmęczeniowe węzłów pozwalają istotnie zmniejszyć liczbę poprawek i modyfikacji prowadzonych już na gotowych obiektach.
- 7. W proponowanym w pracy podejściu do projektowania struktur spawanych przyjęto kilka odmiennych rozwiązań, które pozwalają wykorzystać zarówno najnowsze osiągnięcia badań podstawowych, jak i dostępne rozwiązania techniczne stosowane w teoretycznym i doświadczalnym badaniu złożonych struktur. Podstawowa przewaga proponowanego rozwiązania polega konieczności na znacznym ograniczeniu prowadzenia testów zmęczeniowych na pełnych, bardzo drogich strukturach, przy jednoczesnym zwiększeniu prawdopodobieństwa uzyskania zakładanej trwałości nowoprojektowanych zmęczeniowej struktur. W przypadku przedsiębiorstwa oznacza to znaczną redukcję kosztów produkcji, jak i możliwość przeprowadzenia pełniejszego procesu optymalizacji konstrukcji, szczególnie w przypadku nowych, innowacyjnych rozwiązań, które nigdy wcześniej nie były stosowane i brakuje z tego względu doświadczeń wynikających z ich eksploatacji.
- 8. Ze względu na probabilistyczny charakter procesu zmęczenia materiałów i w większości przypadków fenomenologiczny charakter jego opisu, zaproponowana w pracy metoda wydaje się być najbardziej adekwatną w badaniu zmęczeniowym konstrukcji spawanej. Istotnym aspektem opracowanego rozwiązania jest fakt, iż może ono być, po przeprowadzeniu prac rozwojowych, wdrożone zarówno w jednostkach badawczorozwojowych odbiorcy końcowego, jak też stosowane w formie usługowej przez wyspecjalizowane ośrodki, w tym jednostki naukowo-badawcze. Oznacza to, że grupa docelowa zainteresowana proponowaną metodą może być bardzo szeroka.
- 9. Ograniczenie do minimum prowadzenia badań na pełnych strukturach powoduje, że system projektowy ma pełną zdolność aplikacyjną

w jednostkach gospodarczych zajmujących się konstruowaniem i wytwarzaniem struktur nośnych środków transportu. Jedynie ostateczne badanie weryfikujące, które wymaga testu całej struktury, jest w takim przypadku zlecane do wyspecjalizowanych jednostek posiadających stosowną infrastrukturę i uprawnienia.

- 10. Prezentowana w pracy metoda projektowania złożonych struktur spawanych jest metodą etapową, ściśle powiązaną z poszczególnymi etapami procesu projektowo-konstrukcyjnego. Przyjęte podejście pozwala na rozpatrywanie trwałości zmęczeniowej struktury spawanej w całym zakresie projektowania, a nie jedynie na jego zakończenie podczas badań weryfikacyjnych gotowego obiektu. Na każdym etapie procesu projektowo-konstrukcyjnego podczas badań i obliczeń wykorzystywane są informacje o rzeczywistych obciążeniach eksploatacyjnych obiektu. Z tego względu wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej gotowego obiektu w coraz większym stopniu odzwierciedlają jego rzeczywistą trwałość zmęczeniową.
- 11. Przedstawiona w pracy metoda projektowania może być zastosowana w przypadku złożonych obiektów narażonych na występowanie zmęczeniowego pękania. Podstawą jej wykorzystania w praktyce jest możliwość dekompozycji złożonego obiektu na elementarne węzły. Metoda ta opiera się na założeniu prowadzenia badań na wydzielonych węzłach, a nie na całej strukturze. Badania te służą optymalizacji konstrukcji, jej trwałości zmęczeniowej i wytrzymałości.
- 12. Proponowana w pracy metoda projektowania została poddana weryfikacji podczas badań złożonej konstrukcji spawanej typu rama wózka pojazdu szynowego. Ze względu na przyjęte założenia może być również zastosowana w przypadku innych złożonych obiektów spawanych narażonych na występowanie pęknięć zmęczeniowych (pociągi, maszyny robocze, elementy samolotów, statków itp.). Podstawą jej wykorzystania w praktyce jest możliwość dekompozycji złożonego obiektu na elementarne węzły.
- 13. Skuteczność nowej metody projektowania jest pochodną wielu czynników technologicznych mających wpływ na trwałość zmęczeniową. Zaliczyć można tu np. metodę spawania, liczbę przejść spoiny, kolejność spawania, zabiegi poprawiające jakość złączy spawanych (odprężanie, obróbka lica spoiny itp.). Powyższe wymaga od projektanta posiadania bazy informacji dotyczących danych wytrzymałościowych, zmęczeniowych oraz obciążeniowych poszczególnych rodzajów i typów połączeń. Dane te mogą być uzyskiwane zarówno w wyspecjalizowanych działach badawczorozwojowych jak również w jednostkach uczelnianych współpracujących z przedsiębiorstwami, które takich działów nie posiadają.

14. Trwałość zmęczeniowa złączy spawanych jest nierozerwalnie związana z jakością spoin oraz ich powtarzalnością w zakresie cech geometrycznych, jak również strukturalnych. Aby można z powodzeniem wykorzystywać wyniki badań węzłów spawanych podczas projektowania gotowych obiektów niezbędne jest podobieństwo właściwości materiałowych, technologicznych, zastosowanego modelu obciążenia oraz metody opracowywania wyników badań.

4.2. WYTYCZNE DO DALSZYCH BADAŃ

Przeprowadzona analiza przebiegu oraz wyników badań wskazuje na kilka zagadnień, które wymagają dalszych badań eksperymentalnych. Najważniejsze wymieniono poniżej:

- Zastosowana podczas weryfikacji metody obliczeń i badań struktura spawana ramy wózka jest projektowana na około 30 lat eksploatacji w zróżnicowanych warunkach obciążenia przy możliwości jednoczesnego wystąpienia ekstremalnych temperatur (niskich oraz wysokich). Warunki prowadzenia badań eksperymentalnych prowadzonych w ramach poniższej pracy zostały ograniczone jedynie do temperatur otoczenia i opisu odkształceniowego procesu zmęczenia. Dalsze prace weryfikacyjne powinny uwzględniać warunki eksploatacji wymienionych struktur w warunkach typowej zimy (temperatury do -30 °C), jak również inne opisy procesu zmęczenia (energetyczne, odkształceniowo–naprężeniowe).
- 2. Analizowane w pracy modele obliczeniowe trwałości zmęczeniowej bazowały na przyjęciu jako kryterium uszkodzenia projektowanego obiektu moment pojawienia się pęknięcia zmęczeniowego. Ze względów formalnych zaniechano analizy rozwoju pęknięć zmęczeniowych. Jest to pewne uproszczenie problematyki zmęczeniowej. Niekiedy bowiem samo pojawienie się pęknięcia powoduje redystrybucję naprężeń spawalniczych i w niektórych przypadkach praktycznie znaczne spowolnienie dalszego rozwoju pęknięcia lub nawet zatrzymanie. Przykładem obiektów eksploatowanych z pęknięciami są np. statki morskie. Na podstawie analizy doniesień literaturowych można stwierdzić, że okres trwałości od momentu pojawienia się pęknięcia do całkowitego rozdzielnia elementów jest bardzo długi i niejednokrotnie porównywalny z trwałością do momentu inicjacji pęknięcia. W celu oceny stopnia bezpieczeństwa obiektów eksploatowanych z pęknięciami niezbędne są badania, w których zostaną uwzględnione zagadnienia z obszaru mechaniki pękania.
- Podstawowym problemem, którego proponowana w pracy metoda nie rozwiązuje to powstawanie i uwzględnianie podczas badań naprężeń spawalniczych, które uwidaczniają się w pełnej postaci dopiero w gotowym

wyrobie. W proponowanej metodzie nie zostają uwzględnione ani na próbkach materiałowych, węzłach czy podzespołach. Same naprężenia powodują przesunięcie naprężeń średnich wywołanych obciążeniem zewnętrznym. Nieuwzględnienie wzrostu naprężenia średniego podczas badań węzłów może ostatecznie doprowadzić do zawyżenia trwałości zmęczeniowej badanego węzła spawanego.

LITERATURA

- [1] Baker K, Olson J, Morisseau D. Work practices, fatigue, and nuclear power plant safety performance. Hum Factors 1994;36:244–57.
- [2] De Haven H. Accident survival-airplane and passenger car. 1952.
- [3] Rosochowicz K. Aspects of fatigue cracks in ship steels under the influence of liquid corrosives. Br Marit Technol 1991.
- [4] Kocanda S, Szala J. Podstawy obliczen zmeczeniowych. Wydaw Nauk PWN, Warszawa 1997.
- [5] Möller B, Baumgartner J, Wagener R, Kaufmann H, Melz T. Low cycle fatigue life assessment of welded high-strength structural steels based on nominal and local design concepts. Int J Fatigue 2017;101:192–208. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.02.014.
- [6] Topper TH, Sandor BI, Morrow JD. Cumulative fatigue damage under cyclic strain control. 1967.
- [7] Sorensen Jr A. A general theory of fatigue damage accumulation. J Basic Eng 1969.
- [8] Ligaj B, Szala G. Metoda obliczeń trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych z zastosowaniem dwuparametrycznych charakterystyk zmęczeniowych. acta Mech Autom 2009;3:47–51.
- [9] Rosochowicz K. Problemy pękania zmęczeniowego kadłubów statków. Okrętownictwo i Żegluga 2000.
- [10] Zhu L, Faulkner D. Damage estimate for plating of ships and platforms under repeated impacts. Mar Struct 1996;9:697–720.
- [11] Papaefthymiou SA. Root cause analysis of surface and internal defects of micro-alloyed S355 heavy plates. Int J Struct Integr 2013;4:91–107.
- [12] Burgherr P. In-depth analysis of accidental oil spills from tankers in the context of global spill trends from all sources. J Hazard Mater 2007;140:245–56.
- [13] Stambaugh KA, Wood WA. Ship fracture mechanisms investigation. 1990.
- [14] Mroziński, S; Lipski, A; Piotrowski, M; lis Z. Akredytowane Badania Zlecone. Lab Badań Mater i Konstr 2014;BZ.
- [15] Ferenc K. Spawalnictwo. Laboratorium. Wydaw. PWarsz.; 1989.
- [16] Słania J, Fryc H. Spawanie pojazdów szynowych--plany spawania. Weld Technol Rev 2012;84.
- [17] Masubuchi K. Analysis of welded structures. International Series on Materials Science and Technology; 1982. https://doi.org/10.1016/0026-0800(82)90012-X.
- [18] Radaj D. Heat effects of welding: temperature field, residual stress, distortion. Springer Science & Business Media; 2012.
- [19] Lu J. Handbook of measurement of residual stresses. Fairmont Press; 1996.
- [20] Ueda Y, Fukuda K, Kim YC. New measuring method of axisymmetric

three-dimensional residual stresses using inherent strains as parameters. J Eng Mater Technol 1986;108:328–34.

- [21] Maddox SJ. Influence of tensile residual stresses on the fatigue behavior of welded joints in steel. Residual Stress Eff. Fatigue, ASTM International; 1982.
- [22] Hayashi M, Ishiwata M, Morii Y, Minakawa N, Root JH. Residual stress distribution in carbon steel pipe welded joint measured by neutron diffraction. Mater Sci Res Int 2000. https://doi.org/10.2472/jsms.45.772.
- [23] Shack WJ, Ellingson WA, Pahis LE. Measurement of residual stresses in Type-304 stainless steel piping butt weldments. Phase report. 1980.
- [24] Lu X. Influence of residual stress on fatigue failure of welded joints. North Carolina State Univ 2003.
- [25] Jonsson M, Josefson BL. Experimentally determined transient and residual stresses in a butt-welded pipe. J Strain Anal Eng Des 1988. https://doi.org/10.1243/03093247V231025.
- [26] Murugan S, Rai S, Kumar P. Temperature distribution and residual stresses due to multipass welding in type 304 stainless steel and low carbon steel weld pads. Int J ... 2001. https://doi.org/10.1016/S0308-0161(01)00047-3.
- [27] Wang X, Guo E. Numerical Analysis and Verification of Residual Stress in T Joint of S355 Steel. Frat ed Integrità Strutt 2020;14:25–32.
- [28] Aygül M, Al-Emrani M, Urushadze S. Modelling and fatigue life assessment of orthotropic bridge deck details using FEM. Int J Fatigue 2012.
- [29] Leggatt RH, White JD. Predicting shrinkage and distortion in a welded plate 1977.
- [30] Zhang J. A 3-D composite shell element model for residual stress analysis of multi-pass welds. Proc SMiRT 14 1997;1:335–44.
- [31] Rybicki EF, Schmueser DW, Stonesifer RW, Groom JJ, Mishler HW. A finite-element model for residual stresses and deflections in girth-butt welded pipes. J Press Vessel Technol 1978;100:256–62.
- [32] Brust FW, Stonesifer RB. Effect of weld parameters on residual stresses in BWR piping systems. Final report. 1981.
- [33] Brickstad B, Josefson BL. A parametric study of residual stresses in multipass butt-welded stainless steel pipes. Int J Press Vessel Pip 1998;75:11– 25.
- [34] Hibbitt HD, Marcal P V. A numerical, thermo-mechanical model for the welding and subsequent loading of a fabricated structure. Comput Struct 1973. https://doi.org/10.1016/0045-7949(73)90043-6.
- [35] LI L, DAI K, REN S, WANG P. Simulation and Optimization of Hull Structure Welding Process Based on SYSWELD. Mach Des Manuf 2016:10.
- [36] Gurney TR. Fatigue of welded structures. CUP Archive; 1979.
- [37] Hinnant C, Paulin T, Becht C, Lock WS. Experimental Evaluation of the

Markl Fatigue Methods and ASME Piping Stress Intensification Factors: Part II. ASME 2014 Press. Vessel. Pip. Conf., 2014, s. V003T03A025--V003T03A025.

- [38] Higuchi M, Nakagawa A, Iida K, Hayashi M, Yamauchi T, Saito M, i in. Experimental study on fatigue strength of small-diameter socket-welded pipe joints. J Press Vessel Technol 1998;120:149–56.
- [39] Hirschberg P, Riccardella P, Sullivan M, Schletz J, Carter R. Vibration Fatigue Testing of Socket Welds, Phase II. ASME-PUBLICATIONS-PVP 2000;407:297–306.
- [40] Mochizuki M, Hattori T, Nakakado K. Residual stress reduction and fatigue strength improvement by controlling welding pass sequences. J Eng Mater Technol 2000;122:108–12.
- [41] Sędek P, Węglowski MS. Application of mechanical vibration in the machine building technology. Key Eng. Mater., vol. 504, 2012, s. 1383– 8.
- [42] Augustyniak B, Chmielewski M, Sędek P, Krasnowski K. Badania porównawcze z wykorzystaniem efektu Barkhausena i metody trepanacyjnej stanu naprężenia w złączach spawanych odprężonych cieplnie i mechanicznie. Badania Nieniszcz i Diagnostyka 2019.
- [43] Sędek P, Welcel M, Kwieciński K. Vibratory Stabilisation--Constant Development for Industrial Practice b.d.
- [44] Szala J. Europejskie procedury FITNET przykladem transformacji wiedzy w budowie i eksploatacji maszyn. Tech Rol Ogrod Leśna 2008:7– 13.
- [45] Hobbacher AF. Recommendations for Fatigue Design kumulacaj 92-99 stress history 34-36 hot spot 21-+. Cham: Springer International Publishing; 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23757-2.
- [46] Macdonald K. Fracture and fatigue of welded joints and structures, Elsevier; 2011.
- [47] HOBBACHER A. The new IIW recommendations for fatigue assessment of welded joints and components – A comprehensive code recently updated. Int J Fatigue 2009;31:50–8. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.04.002.
- [48] Haagensen PJ. Fatigue strength improvement methods. Fract. Fatigue Welded Joints Struct., Elsevier; 2011, s. 297–329.
- [49] Haagensen PJ. Improvement of the fatigue strength of welded joints. Comm Eur Communities, 1981:309–64.
- [50] Prevéy PS, Cammett JT. The Effect of Shot Peening Coverage on Residual Stress, Cold Work and Fatigue in a Ni-Cr-Mo Low Alloy Steel. 8th Int Conf Shot Peen 2002. https://doi.org/10.1002/3527606580.ch37.
- [51] Petit-Renaud F, Evans JT, Metcalfe A V., Shaw BA. Optimization of a shot peening process. Proc Inst Mech Eng Part L J Mater Des Appl 2008. https://doi.org/10.1243/14644207JMDA176.
- [52] Fisher JW, Albrecht P, Yen BT, Klingerman DJ, McNamee BM. Fatigue

strength of steel beams with welded stiffeners and attachments. NCHRP Rep 1974.

- [53] Szala J, Boroński D. Ocena stanu zmeczenia materiału w diagnostyce maszyn i urzadzeń. Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy; 2008.
- [54] Colombi P, Dolinski K. Fatigue lifetime of welded joints under random loading: rainflow cycle vs. cycle sequence method. Probabilistic Eng Mech 2001;16:61–71.
- [55] Taylor D. The theory of critical distances. Eng Fract Mech 2008;75:1696–705.
- [56] Radaj D, Sonsino CM (Cetin M, Fricke W (Wolfgang). Fatigue assessment of welded joints by local approaches. Woodhead; 2006.
- [57] Fricke W. Fatigue analysis of welded joints: state of development. Mar Struct 2003;16:185–200. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0951-8339(02)00075-8.
- [58] Niemi E. Stress determination for fatigue analysis of welded components. 1995.
- [59] Shome M, Tumuluru M. Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS). 2015. https://doi.org/10.1016/C2013-0-16259-9.
- [60] Tc CEN. Eurocode 3 : Design of steel structures. Communities 2004. https://doi.org/10.1002/9783433601099.
- [61] Bródka J, Broniewicz M. Projektowanie konstrukcji stalowych według Eurokodów. Polskie Wydawnictwo Techniczne; 2013.
- [62] Marshall PW, Wardenier J, others. Tubular versus non-tubular hot spot stress methods. Fifteenth Int. Offshore Polar Eng. Conf., 2005.
- [63] Lotsberg I, Sigurdsson G. Hot spot stress SN curve for fatigue analysis of plated structures. J offshore Mech Arct Eng 2006;128:330–6.
- [64] Niemi E, Tanskanen P. Hot spot stress determination for welded edge gussets. Weld World 2000;44:31–7.
- [65] Fricke W. Evaluation of hot spot stresses in complex welded structures. Proc IIW Fatigue Semin Tokyo 2002.
- [66] Fricke W, Cui W, Kierkegaard H, Kihl D, Koval M. Comparative fatigue strength assessment of a structural detail in a containership using various approaches of classification societies. Mar Struct 2002.
- [67] EN BS. 1-9 (2005): Design of Steel Structures. Part 1.9: Fatigue. Br Stand Institution, London 1993.
- [68] Lotsberg I. Fatigue design of plated structures using finite element analysis. Ships Offshore Struct 2006;1:45–54.
- [69] Fricke W, others. Recommended hot-spot analysis procedure for structural details of ships and FPSOs based on round-robin FE analyses. Int J Offshore Polar Eng 2002;12.
- [70] Lotsberg I. Recommended methodology for analysis of structural stress for fatigue assessment of plated structures. Proc. OMAE Spec. Symp. Integr. Float. Prod. Storage Offloading Syst., 2004.
- [71] Dong P, Hong JK. Analysis of hot spot stress and alternative structural

stress methods. ASME 2003 22nd Int. Conf. Offshore Mech. Arct. Eng., 2003, s. 213–24.

- [72] Dong P. A structural stress definition and numerical implementation for fatigue analysis of welded joints. Int J Fatigue 2001;23:865–76.
- [73] Dong P. A robust structural stress method for fatigue analysis of offshore/marine structures. J offshore Mech Arct Eng 2005;127:68–74.
- [74] Hong JK. Evaluation of weld root failure using battelle structural stress method. J Offshore Mech Arct Eng 2013;135:21404.
- [75] XIAO Z. A method of determining geometric stress for fatigue strength evaluation of steel welded joints. Int J Fatigue 2004. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.05.001.
- [76] Noh BW, Song JI, Bae SI. Fatigue strength evaluation of the load-carrying cruciform fillet welded joints using hot-spot stress. Key Eng. Mater., vol. 324, 2006, s. 1281–4.
- [77] Fricke W, Kahl A. Comparison of different structural stress approaches for fatigue assessment of welded ship structures. Mar Struct 2005;18:473– 88.
- [78] Neuber H. Theoretical determination of fatigue strength at stress concentration. 1967.
- [79] Zhang G, Richter B. New approach to the numerical fatigue-life prediction of spot-welded structures. Fatigue Fract Eng Mater Struct 2000. https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2000.00316.x.
- [80] Sonsino CM. A Consideration of Allowable Equivalent Stresses for Fatigue Design of Welded Joints According to the Notch Stress Concept with the Reference Radii rref = 1.00 and 0.05 mm. Weld World 2009. https://doi.org/10.1007/BF03266705.
- [81] ASTM. E606 Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing. E606/E606M-12 2004. https://doi.org/10.1520/E0606-04E01.Copyright.
- [82] Ramberg W, Osgood WR. Description of stress-strain curves by three parameters. Tech. Notes Nat Adv Comm Aeronaut 1943.
- [83] Niesłony A, Dsoki C e., Kaufmann H, Krug P. New method for evaluation of the Manson-Coffin-Basquin and Ramberg-Osgood equations with respect to compatibility. Int J Fatigue 2008;30:1967–77. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.01.012.
- [84] Manson SS. Avoidance, control, and repair of fatigue damage. Met. Fatigue Damage Mech. Detect. Avoid. Repair, ASTM International; 1971.
- [85] Duyi Y, Zhenlin W. Change characteristics of static mechanical property parameters and dislocation structures of 45# medium carbon structural steel during fatigue failure process. Mater Sci Eng A 2001;297:54–61.
- [86] J. Szala. Hipotezy sumowania uszkodzeń zmęczeniowych. Bydgoszcz Wydaw Akad Tech im Jana i Jędrzeja Śniadeckich, 1998 1998:175.
- [87] Masing G. Eigenspannungen und Verfestigung beim Messing [Fundamental stresses and strengthening with brass]: Inter-national

Congress of Applied Mechanics, 2d. Zirich, 1926, Proc 1926.

- [88] Chiang D-Y. The generalized Masing models for deteriorating hysteresis and cyclic plasticity. Appl Math Model 1999;23:847–63.
- [89] Neuber H. Theory of stress concentration for shear-strained prismatical bodies with arbitrary nonlinear stress-strain law. J Appl Mech 1961;28:544–50.
- [90] Meyers MA, Chawla KK. Mechanical Behavior of Materials 2008. https://doi.org/10.1017/CBO9780511810947.
- [91] Manson SS, Halford GR. Practical implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for treating cumulative fatigue damage. Int J Fract 1981;17:169–92.
- [92] Manson SS, Muralidharan U. Fatigue life prediction in bending from axial fatigue information. Fatigue Fract Eng Mater Struct 1987;9:357–72.
- [93] Sornette D, Magnin T, Brechet Y. The physical origin of the Coffin-Manson law in low-cycle fatigue. EPL (Europhysics Lett 1992;20:433.
- [94] Mroziński S. Comparison analysis of low-cycle properties of 45 steel under uniaxial loading and bending. Arch Mech Eng 2000;47:105–17.
- [95] Kauzlarich JJ. The Palmgren-Miner rule derived. Tribol. Ser., vol. 14, Elsevier; 1989, s. 175–9.
- [96] Halford GR, Manson SS. Life prediction of thermal-mechanical fatigue using strainrange partitioning. Therm. fatigue Mater. components, ASTM International; 1976.
- [97] Smith KN. A stress-strain function for the fatigue of metals. J Mater 1970;5:767–78.
- [98] J. Szala, S. Mroziński DB. Badania Zlecone. Lab Pod Konstr Masz 1991;Badania i.
- [99] MROZIŃSKI S, PEPLIŃSKI J. The influence of the butt weld on fatigue life. J Polish CIMAC 2011;6:165–72.
- [100] Haibach E, Olivier R. Fatigue investigation of higher strength structural steels in notched and in welded condition. Synthesis of results and tentative conclusions 1974.
- [101] Kim MH, Kang SW. Testing and analysis of fatigue behaviour in edge details: a comparative study using hot spot and structural stresses. Proc Inst Mech Eng Part C J Mech Eng Sci 2008;222:2351–63.
- [102] Wagner M. Fatigue strength of structural members with in-plane notches. Int Inst welding, Doc 1998;13:1730–98.
- [103] Mroziński SK, Piotrowski M, Burak M, Pejkowski Ł. Influence of connection type on the fatigue life of welded. J Polish CIMAC 2013.
- [104] Kozak J. Problemy badań laboratoryjnych wielkogabarytowych modeli konstrukcji okrętowych 2009.
- [105] Sobczykiewicz W. An Effect of Design Configuration and Manufacturing Technology on Fatigue Life of Welded Structures. Weld Institute, 1987:73–7.
- [106] Kozak J. Stalowe panele sandwicz w konstrukcjach okrętowych.

unknown; 2018.

- [107] Lee M-Y. Development of MG tube using laser welding for bike frame. Int. Congr. Appl. Lasers Electro-Optics, vol. 2010, 2010, s. 436–43.
- [108] Callens A, Bignonnet A. Fatigue design of welded bicycle frames using a multiaxial criterion. Procedia Eng 2012;34:640–5.
- [109] SO 4210-6:2015. ISO 4210-6:2015(en) Cycles Safety requirements for bicycles — Part 6: Frame and fork test methods. ISO; b.d.
- [110] Zhang O, Poirier JA, Barr JE. Modified Locati method in fatigue testing. 2003.
- [111] DIN EN 12663-1:2015-03 -Railway applications Structural requirements of railway vehicle bodies Part 1 2015.
- [112] ASTM E0837-08E01. E0837-08E01.practice Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Dr. ASTM Int 2002;03:1–10. https://doi.org/10.1520/E0837-08E01.practice.
- [113] ISO. ISO 6507-1:2005: Metallic materials -- Vickers hardness test -- Part 1: Test method. 2005.
- [114] Glinka G. Calculation of inelastic notch-tip strain-stress histories under cyclic loading. Eng Fract Mech 1985. https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90112-2.
- [115] Ślęczka L, Giżejowski M, Barszcz A. Dobór stali ze względu na odporność na kruche pękanie i ciągliwość międzywarstwową według PN-EN 1993-1. Inżynieria i Bud 2010;66:159–66.
- [116] Pandey C, Mahapatra MM, Kumar P, Saini N. Homogenization of P91 weldments using varying normalizing and tempering treatment. Mater Sci Eng A 2018;710:86–101.

STRESZCZENIE

Praca doktorska dotyczy problematyki obliczeń i badań trwałości zmęczeniowej obiektów technicznych powstałych z wykorzystaniem technologii spawania i związana jest dyscypliną naukową budowa i eksploatacja maszyn (obecnie inżynieria mechaniczna). Skutkiem zastosowania spawania jest wystąpienie strukturze obszarów spiętrzeń naprężeń (spoiny), które są naturalnymi miejscami inicjacji pęknięć zmęczeniowych. W obliczeniach trwałości wymienionych struktur wykorzystuje się między innymi dane materiałowe określane podczas niskocyklowych badań zmęczeniowych.

Celem podstawowym rozprawy doktorskiej było opracowanie założeń oraz doświadczalna weryfikacja nowej metody obliczeń i badań złożonych struktur spawanych ze względu na trwałość zmęczeniową. Znamiennym dla nowej metody było ograniczenie zakresu kosztochłonnych badań gotowych obiektów oraz jednocześnie wzrost ich jakości, niezawodności i bezpieczeństwa eksploatacji.

W pracy przeprowadzono analizę dotychczasowego stanu wiedzy obejmującego opis połączeń spawanych, stosowanych modeli obliczeniowych oraz metod ich wykorzystywania podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej. Przegląd i analiza stanu wiedzy oparte zostały na doniesieniach literaturowych jak również doświadczeniach laboratoriów specjalizujących się w badaniach doświadczalnych kompletnych struktur spawanych jak również węzłów spawanych.

W przeprowadzonym przeglądzie wiedzy wykazano zalety metod numerycznych wykorzystywanych podczas projektowania struktur spawanych z jednoczesnym uwypukleniem stosowanych uproszczeń i zmian parametrów pracy, które mają wpływ na uzyskane wyniki przyjętego sposobu modelowania obiektu. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że 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.

Na podstawie przeprowadzonej krytycznej analizy sformułowano założenia do metody projektowania złożonych struktur spawanych. Przyjęto, że podstawą nowoczesnego projektowania złożonych obiektów w tym struktur spawanych powinna być realizacja iteracyjnego procesu, w którym badania doświadczalne będą przeplatane obliczeniami (np. numerycznymi).

Weryfikację przedstawionej w pracy propozycji postępowania przeprowadzono na bazie złożonej struktury spawanej, jaką jest spawana rama wózka pojazdu szynowego. W ramach badań własnych przeprowadzono testy zmęczeniowe próbek oraz węzłów spawanych wykonanych ze stali zastosowanej na ramę wózka w warunkach obciążeń monotonicznych i zmęczeniowych. W programie badań własnych uwzględnione zostały również badania
eksperymentalne zarówno próbek materiałowych jak również połączeń spawanych o różnym stopniu skomplikowania.

Analizę wyników badań prowadzono w aspekcie wpływu grubości blachy i wielkości odkształcenia na przebieg stabilizacji oraz na trwałość zmęczeniową. W pracy doktorskiej dokonano również oceny ilościowej wpływu przebiegu zmian własności cyklicznych na wykorzystywane podczas obliczeń dane materiałowe. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wartości parametrów pętli histerezy jak również danych materiałowych wykorzystywanych podczas obliczeń trwałości zależą od okresu trwałości zmęczeniowej, w którym zostały określone.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań zmęczeniowych próbek, węzłów spawanych oraz kompletnych struktur wykazano, że na tych samych poziomach odkształcenia w obszarach spiętrzeń naprężeń uzyskiwano zbliżone trwałości zmęczeniowe. Powyższe świadczy o poprawnym odwzorowaniu obciążeń zmęczeniowych na próbkach, węzłach oraz strukturach. Pomimo, że uzyskane w wyniku dekompozycji węzły badawcze podobnie jak wielkogabarytowa struktura nie uległy uszkodzeniu w trakcie badań to po przeliczeniu wykazano, że uzyskane prawdopodobne trwałości badanych obiektów pozwolą na uzyskanie wyników znajdujących się w bezpiecznym obszarze trwałości.

Pracę kończy podsumowanie i wnioski. Sformułowane wnioski mają znaczenie praktyczne, gdyż wskazują na realne możliwości poprawy skuteczności metod projektowania złożonych struktur spawanych jak również praktycznego wykorzystania przez producentów struktur spawanych.

ABSTRACT

The doctoral dissertation concerns the calculation and fatigue durability of technical objects made with the use of welding technology. It concerns the scientific discipline of mechanical engineering. The effect of the use of welding is the formation of the structure of stress concentration areas (welds), which are natural places of fatigue crack initiation. When calculating the durability of the above-mentioned The construction is used, among others material data determined during low-cycle fatigue tests.

The main purpose of the doctoral dissertation was to develop the assumptions and experimental verification of a new method of calculating and testing complex welded structures in terms of fatigue life. A characteristic feature of the new method was the limitation of the scope of costly tests of finished objects, and at the same time an increase in their quality, reliability and operational safety.

The paper presents an analysis of the current state of knowledge, including a description of welded joints, applied calculation models and methods of their use in the calculation of fatigue life. The basis for the review and analysis of the state of knowledge are literature reports and the experience of laboratories specializing in experimental tests of complete welded structures and welded joints.

The knowledge review showed the advantages of numerical methods used in the design of welded structures with simultaneous emphasis on the simplifications and changes in working parameters that affect the obtained results of the adopted method of object modeling. Based on the conducted analysis, it was found that, despite the significant development of numerical methods used in the design of welded structures, the basic method of verifying the selected design features of finished products is still testing complete objects or structure fragments in the form of specially made nodes.

Based on the conducted critical analysis, assumptions for the method of designing complex welded structures were formulated. It was assumed that the basis for modern design of complex objects, including welded structures, should be the implementation of an iterative process in which experimental research will be interwoven with calculations (e.g. numerical).

The verification of the proposed procedure presented in the paper was carried out on the basis of a complex welded structure, which is the welded frame of a rail vehicle bogie. As part of the own research, fatigue tests were carried out on samples and welded nodes made of steel used for the bogie frame under monotonic and fatigue loads. Our own research program also included experimental tests of both material samples and welded joints of varying complexity.

The analysis of the test results was carried out in terms of the effect of sheet thickness and deformation size on the stabilization process and fatigue life. The

doctoral dissertation also included a quantitative assessment of the influence of the course of changes in cyclic properties on the material data used in the calculations. On the basis of the conducted tests, it was found that the values of the hysteresis loop parameters and the material data used for the durability calculations depend on the fatigue life period in which they were determined.

Based on the analysis of the results of fatigue tests on samples, welded joints and entire structures, it was shown that at the same levels of deformation in the stress concentration areas, similar fatigue life was obtained. The above proves the correct representation of fatigue loads on samples, nodes and structures. Despite the fact that the research nodes obtained as a result of decomposition, as well as the large-size structure were not damaged during the tests, after recalculation it was shown that the obtained probable durability of the tested objects will allow obtaining the results safe durability area.

The paper ends with a summary and conclusions. The formulated conclusions are of practical importance as they indicate real possibilities of improving the effectiveness of the methods of designing complex welded structures and the practical use by manufacturers of welded structures.

ZAŁĄCZNIK NR 1

SK			INSTRUK	CJA TEC WELDING PI	CHNOI ROCEDUI	LOGIC	ZNA SPA	WANIA	Fo-32 Wydanie 2 Data wydania: 06.10.2014
			WP	S: 135/1	0V / P2	A / 02			
	WPQR	; 135/0	9/09	Jedr	Jednostka inspekcyjna : Główny Spawalnik/Césg/J				Felding Engineer
Nazwisko spawacza : wg wy Welder nome Sposób przenoszenia : miesz			vkazariaccording to the i	liat Metoda y i ezyszcz Preporau	Inspection unit Metoda przypotowania Lezyszczenia Preparawon and cleaning		: mechaniczna/mechanica/		
metalu Mesol tr Typ złą Joint (w	ransfer method Icza (spoiny) wild) type	: doczo	howe (BW)/burnseld	mothod Gatunek Moverial	mothod Gatunek materiału Moveriol grade / Graup		: S235JR, S355J2+N оуд PN-55N то 1.1; 1.2 уд СК 150 15666		WE PN-EN 10005
		SZCZ	EGOLY PRZYG WELDED JOI	OTOWANIA INT PREPARA	ZŁĄCZA TION DE	SPAWA!	NEGO (SZKH ketch)	C)	
	Zakres obowi: Application	szywania rozne	Konstrukcja złącza –			111120 (8	Kolejność spawania		
Oznaczo	enie spoiny / D	lesignation:						in claimy orace	
	10 \	/	50+5	0		-			
Grabosi	é materiala pe	odstawowego:	Ь	~ ~ ~					
- 10	i iniceness		[mm]:		0	1		4	
- 101	na m		2-3			1	Ľ	T	1
irednies Webe ext	i zewieştrzia i diameter	ury:	c [mm]	0					
9			0-1						
Pozycja Velding j	spawania: position	PA	\$ [mm]						
		SZCZEG	ÓŁY DOTYCZĄ	CE SPAWANI	A	t	Urząd Froniu	zenie/ Mochin s TPSi 400	c1
Ścieg Run	Proces spawania Welding	Wymiar spoiwa (mm) Filler metel	Prad spawania [A] Welding current	Napięcie spawa [M] Weiding	prądu ania l voftage	Rodzaj prądu Covrent	Predkość podawania drutu [m/min] Wire foading	Prędkość przesuwu (cm/min) 7/avel	llość wprowadz. Ciepła [kJ/mm] Supplied heat
1	135	Ø 1.0	125 - 140	16,8-	17,4	DC(+)	4.5 - 6.0	14 - 20	5.0 - 8.4
2	135	Ø 1.0	205 - 225	27,5 -	28,5	DC(+)	10 - 11	41 - 58	4,6 - 7,6
3	135	Ø 1.0	210 - 240	27,5-	28,5	DC(+)	10 - 12	30 - 46	6,0 - 11,0
4	135	Ø 1.0	205 - 230	27,5 -	28,5	DC(+)	10 - 11	23 - 34	8,1 - 13,5
volwo a ytwórce me (p elekti ngsitte a imp. po- anpentai ngerani ygrzewi stweid a coepóly or / back	maczenie / Fil a / Monifoction rody wolErami (cetrode type / degrzewania wi g temperature gdzyściegowa re deniew wela nakie po spował eaking żłubienia gran tog growing d	ier metal ur / Trade meij / Wymiar dioxension stępnego bog sequences tła i / podkładki etoffs	: G 42 4 M21 3 **EN 150-101CA : UP ESAB.MULT : - : (min. +5° C) : max. 250° C : - : - : - : Obróbia Fri	SII INED.SANDVIK ciepine po spawa	Oznaczel osłonowe zosrałać Informac Kąt ustaw <i>Electroch</i> Odległoś Distonce I Sparwnik Pulsating- niu (dub sta włor zgwing	nle gaza – si go / smelding go grani ding je dodatkow vienla uchwy setting angle setting angle i rurka stylo setwan com pradem pul urrent welds rzenie Mi	trumień objętości ² : ve / Addimanał Jegła ymu wa detal az / Juke and worky Isacyjaym mg detala stacyjaym mg detala	gkon / Ger des M21: 12-14 ng Ex ISO remation : : :	ignation 4 1/min 1975 0k. 80° 15±5 mm
Czas / I	time:	- Te	mperatura l'iemperatur sele 11	r - T			rethod:	1.20	
repored	an: by Macie	Ruciński	Stadin's li	Data / Dow:	02.12.201	A hispech	on mut		
opt are us	Adrian	Pronobis	MAD1100-1	Data J Date:	02 12 201	5 1			