

Politechnika Śląska
Wydział Transportu
Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Michał MIROS

**WPLYW NAPRAW SPAWALNICZYCH NA
WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNE ELEMEN-
TÓW NOŚNYCH POJAZDÓW CIĘŻAROWYCH**

Promotor:

Dr hab. inż. Tomasz WĘGRZYN prof. nzw. w Pol. Śl.

Katowice, czerwiec 2010

Spis treści

1. WSTĘP.....	5
1.1. CEL PRACY	7
2. BEZPIECZEŃSTWO AUTOBUSÓW, POJAZDÓW CIĘŻAROWYCH I SPECJALNYCH.....	8
3. RAMY POJAZDÓW CIĘŻAROWYCH.....	11
3.1. RAMY PODWOZIOWE - GŁÓWNE	11
3.2. RAMY DODATKOWE	14
3.2.1. Ramy wywrotu	15
3.2.2. Ramy podkontenerowe.....	16
3.2.3. Ramy podżurawiowe.....	17
3.3. RAMY PRZYCZEP I NACZEP SAMOCHODOWYCH	18
4. MATERIAŁY STOSOWANE DO BUDOWY RAM	18
4.1. STALE NISKOSTOPOWE O PODWYŻSZONEJ WYTRZYMAŁOŚCI	18
5. NAPRĘŻENIA W RAMACH POJAZDÓW CIĘŻAROWYCH.....	20
6. WARUNKI EKSPLOATACJI RAM POJAZDÓW CIĘŻAROWYCH.....	26
7. NAPRAWY RAM POJAZDÓW METODAMI SPAWALNICZYMI	28
7.1. NAPRAWA RAM	29
7.2. ASPEKTY TECHNICZNE I EKONOMICZNE NAPRAWY	30
7.3. DODATKOWE WYMAGANIA ODNOŚNIE SPOSOBU PRZEPROWADZANIA SPAWANIA RAM POJAZDÓW CIĘŻAROWYCH	32
8. PROCESY SPAWANIA W NAPRAWIE ORAZ PRZEBUDOWIE RAM POJAZDÓW CIĘŻAROWYCH	35
8.1. SPAWALNICZE METODY STOSOWANE W NAPRAWACH ORAZ PRZEBUDOWACH POJAZDÓW CIĘŻAROWYCH	35
8.1.1. Spawanie lukowe w osłonie gazowej elektrodą topliwą (GMA, MIG/MAG)	36
8.1.2. Spawanie ręczne elektrodą otuloną (MMA)	36
8.2. STRUKTURA METALOGRAFICZNA STOPIWA	37
8.3. PODZIAŁ METOD SPAWALNICZYCH.....	39
8.3.1. Podział pod względem zawartości wodoru	39
8.3.2. Podział pod względem zawartości tlenu	40
8.4. WPŁYW ZAWARTOŚCI TLENU NA UDARNOŚĆ STOPIWA.....	42
8.5. WYTRZYMAŁOŚĆ ZŁĄCZY SPAWANYCH.....	42
8.6. PODSUMOWANIE PRZEGLĄDU LITERATURY	44
8.7. TEZA	48
9. ZASTOSOWANIE KRYTERIUM TLENOWEGO DO WYBORU METOD SPAWALNICZYCH DO NAPRAW ORAZ PRZEBUDÓW RAM POJAZDÓW CIĘŻAROWYCH	49
10. PROGRAM BADAŃ I JEGO UZASADNIENIE.....	51
10.1. PLAN BADAŃ WSTĘPNYCH.....	51
10.2. PLAN BADAŃ ZASADNICZYCH	52
11. WYTYPOWANIE METOD BADAWCZYCH	54
11.1. METODY SPAWANIA OBJĘTE BADAANIAMI	56
12. BADANIA WSTĘPNE.....	56
12.1. OKREŚLENIE ZAWARTOŚCI TLENU W STOPIWACH WYKONANYCH BADANYMI METODAMI ORAZ ICH PODZIAŁ.....	56
12.2. OKREŚLENIE ŚREDNIC ORAZ SKŁADU CHEMICZNEGO UJAWNIONYCH WTRĄCIEŃ NIEMETALICZNYCH W BADANYCH STOPIWACH	59
12.3. USTALENIE ZALEŻNOŚCI MATEMATYCZNEJ POMIĘDZY WYMIARAMI WTRĄCIEŃ NIEMETALICZNYCH A ZAWARTOŚCIĄ TLENU W STOPIWIE.....	65
12.4. OKREŚLENIE UDZIAŁÓW PROCENTOWYCH ODMIAN MORFOLOGICZNYCH FERRYTU W STRUKTURACH METALOGRAFICZNYCH STOPIW (IDENTYFIKACJA FAZ)	68
12.5. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ WSTĘPNYCH	74

13. BADANIA ZASADNICZE	76
13.1. UDARNOŚĆ STOPIW	76
13.2. UDARNOŚĆ STOPIW PO ODKSZTAŁCENIU WSTĘPNYM	80
13.3. WYTRZYMAŁOŚĆ DORAŻNA STOPIW	82
13.4. WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA BADANYCH STOPIW	87
13.5. POMIAR NAPRĘŻEŃ EKSPLOATACYJNYCH W SPAWANEJ RAMIE POJAZDU CIĘŻAROWEGO	90
13.5.1. <i>Analityczna analiza momentów gnących i naprężeń w podłużnicach ramy naczepy samowładowczej</i>	91
13.5.2. <i>Analizy MES</i>	94
13.5.2. <i>Pomiar wielkości naprężeń rzeczywistych metodami tensometrycznymi</i>	99
13.6. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ ZASADNICZYCH I WNIOSKI	105
LITERATURA	111
ZAŁĄCZNIK 1- SPIS RYSUNKÓW	120
ZAŁĄCZNIK 2- SPIS TABLIC	124
STRESZCZENIE	125
SUMMARY	127

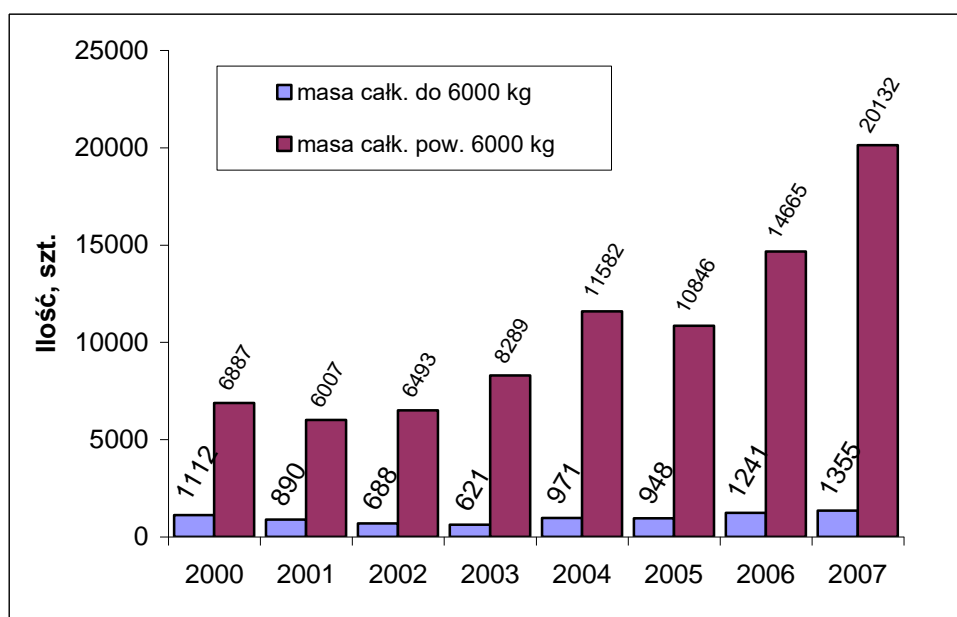
Wykaz jednostek, oznaczeń i skrótów

Symbol	Jednostka	Opis
MIS	-	Międzynarodowy Instytut Spawalnictwa
EB	-	Spawanie otulonymi elektrodami zasadowymi
ER	-	Spawanie otulonymi elektrodami rutyłowymi
MIG	-	Spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazu obojętnego
MAG	-	Spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazu aktywnego
MAC	-	Martenzyt, austenit szczątkowy, węgliki
TIG	-	Spawanie elektrodą nietopliwą w osłonie gazu obojętnego
Kryterium wodoro- rowe	-	Kryterium dzielące metody spawania na podstawie zawartości wodoru w stopiwie
Kryterium tleno- we	-	Kryterium dzielące metody spawania na podstawie zawartości tlenu w stopiwie
Pojazd	-	Środek transportu przeznaczony do poruszania się po drodze oraz maszyna lub urządzenie do tego przystosowane
Pojazd ciężarowy	-	Pojazd o dopuszczalnej masie całkowitej przekraczającej 3,5 t
HDS	-	Hydrauliczny dźwig samochodowy
w	μm	Średnia średnica wtrącenia niemetalicznego
t	ppm	Zawartość tlenu w stopiwie
a	%	Ilość drobnoziarnistego ferrytu (<i>acicular ferrite</i>)

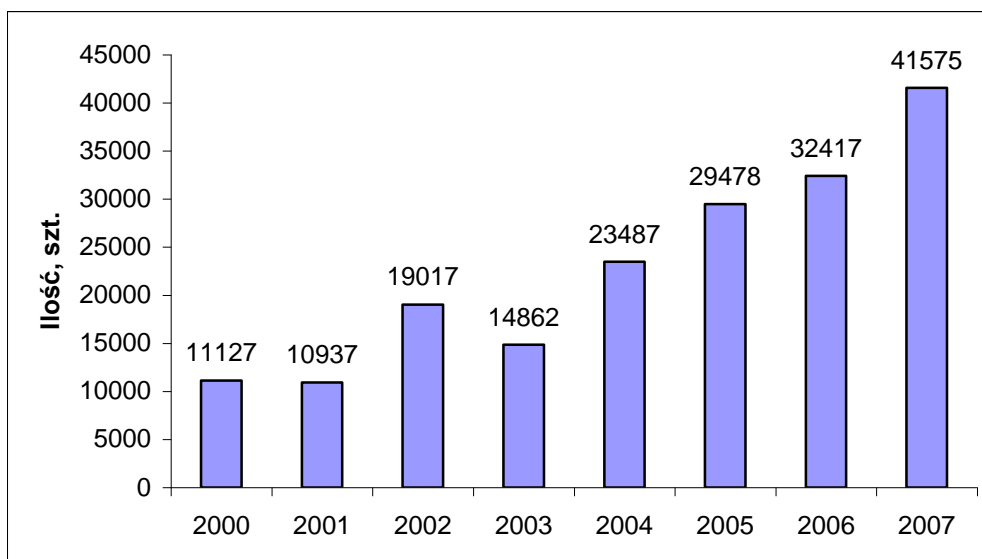
1. Wstęp

Wejście Polski do Unii Europejskiej spowodowało wyraźny wzrost zapotrzebowania na samochody użytkowe [1, 2]. Zapotrzebowanie to jest związane między innymi z bardzo intensywnie rozwijającą się branżą budowlaną, która sama w sobie jest uzależniona od pojazdów z nadwoziami typu betoniarka, dźwig itp., jak również generuje wielkie potrzeby przewozowe realizowane samochodami ciężarowymi.

Wzmożone zapotrzebowanie na usługi związane z użyciem pojazdów ciężarowych powoduje, iż w eksploatacji poza nowymi, intensywnie eksploatowanymi pojazdami, w dalszym ciągu są używane są również pojazdy starsze. Ruch pojazdów ciężarowych na drogach Polski jest już bardzo znaczny, a spodziewać się należy jeszcze większego jego nasilenia. Świadczyć o tym może tendencja wzrostowa w imporcie ciężarowych samochodów używanych jak również sprzedaż pojazdów nowych (rys. 1, 2).



Rys. 1. Sprzedaż nowych pojazdów ciężarowych [2]



Rys. 2. Import używanych pojazdów ciężarowych [2]

Użytkowanie pojazdów prowadzi do ich starzenia się w efekcie procesów zużywania lub różnego rodzaju uszkodzeń. Ważnymi metodami napraw zarówno nowych jak i starszych pojazdów ciężarowych są zabiegi z zastosowaniem metod spawalniczych [3÷8]. Za pomocą spawania są przeprowadzane naprawy powypadkowe, naprawy pęknięć ram, czynności związane z zabudową na ramie pojazdu odpowiednich urządzeń oraz agregatów wymaganych przez indywidualnego użytkownika, np. zabudowa dźwigu typu HDS na ramie samochodu ciężarowego.

Od spawanych połączeń w ramach pojazdów ciężarowych jest wymagana duża wytrzymałość oraz wysoka udarność. Naprawiane poprzez spawanie części samochodów muszą spełniać wymagania stawiane bardzo odpowiedzialnym konstrukcjom, co najmniej 2 klasy (*cechują się obecnością dynamicznych i zmęczeniowych obciążeń oraz prawdopodobieństwem zagrożenia życia ludzkiego*) [9].

Stale zwiększająca się liczba pojazdów ciężarowych oraz ich intensywna eksploatacja wymusza większe zapotrzebowanie na naprawy wymagające spawania. Naprawy spawalnicze prowadzone w autoryzowanych warsztatach obsługowo-naprawczych muszą uwzględniać wytyczne podawane w instrukcjach napraw wydawanych przez producentów pojazdów. Jednak w grupie zalecanych do spawania ram pojazdów ciężarowych metod spawalniczych znajdują się również metody, których stopiwo nie gwarantuje odpowiednio wysokich właściwości mechanicznych połączenia spawanego. Zatem dobór metody spawalniczej, uwzględniający zalecenia instrukcji napraw nie zawsze gwarantuje powstanie złącza spawanego o wysokich właściwościach mechanicznych. Ponadto naprawy pojazdów są wykonywane są również w warsztatach nieautoryzowanych, gdzie zwiększa się prawdopodobieństwo zastosowania nie-

właściwej metody spawalniczej (*dobór metody bez uwzględniania jakiegokolwiek instrukcji napraw*). Niewłaściwie naprawiony pojazd pogorszy stan bezpieczeństwa na naszych drogach i miejscach załadunku oraz rozładunku pojazdów ciężarowych. Wprowadzenie prawidłowych metod spawalniczych w warsztatach naprawiających pojazdy ciężarowe wpłynie pozytywnie na poziom bezpieczeństwa biernego pojazdów. Konieczne jest przeprowadzenie wyczerpujących, wnikliwych oraz dokładnych analiz złączy spawanych pod kątem ich eksploatacji w pojazdach ciężarowych. Analiza taka stanowi istotę niniejszej pracy.

Bezpieczeństwo w ruchu drogowym od dawna jest kwestią niezmiernie istotną, gdyż chodzi o zagrożenie zdrowia lub życia ludzkiego. Podczas eksploatacji pojazdów ciężarowych niebezpieczeństwo związane z eksploatacją połączeń spawanych wykonanych nieodpowiednią metodą pojawia się co najmniej w dwóch sytuacjach. Samochody ciężarowe są eksploatowane w ruchu drogowym, gdzie poza nimi poruszają się inne pojazdy. Następstwem nieodpowiednich napraw może być np. odrywanie się elementu pojazdu ciężarowego, który stanowi bezsprzeczne zagrożenie dla ruchu innych pojazdów. Znane są przypadki, gdy do wypadku dochodzi z powodu najechania na oderwany element lub uderzenia oderwanej części w inny pojazd. Drugą sytuacją generującą wielkie niebezpieczeństwo jest eksploatacja pojazdów z niewłaściwie wykonanymi złączami mocującymi wszelakiego rodzaju urządzenia załadowczo-rozładowcze. Urządzenia są przystosowane do podnoszenia ładunków o znacznym ciężarze. W sytuacji, gdy urządzenie takie wykorzystywane jest do załadunku lub rozładunku, na mocowania tego urządzenia oddziałują znaczne momenty sił oraz siły o charakterze udarów. Źródłem momentów sił jest obciążenie podnośnika ciężarem ładunku w chwili oderwania tego ładunku od podłoża. Momenty siły oraz siły o charakterze udarowym mogą być powodem zniszczenia złącza spawanego o zbyt niskich właściwościach plastycznych i wytrzymałościowych, które zostało wykonane niewłaściwą metodą spawalniczą. Następstwem, czego może być zniszczenie całego mocowania oraz upadek załadunku w przypadkowym miejscu.

1.1. Cel pracy

Brak ogólnych wytycznych dotyczących procesów spawalniczych do napraw i przebudów ram pojazdów ciężarowych spowodował, iż zalecanymi przez producentów pojazdów ciężarowych metodami spawalniczymi są również metody, których stopiwo charakteryzuje się niskimi właściwościami plastycznymi oraz wytrzymałościowymi. Potrzeba wyeliminowania metod spawalniczych niegwarantujących powstania złączy o odpowiednio wyso-

kich właściwościach mechanicznych do eksploatacji pojazdów ciężarowych spowodowała, iż jako cel niniejszej pracy przyjęto:

- 1) Systematykę zalecanych do napraw oraz przebudów ram pojazdów ciężarowych metod spawania.*
- 2) Wybór właściwych metod spawalniczych do naprawy oraz przebudowy ram pojazdów ciężarowych gwarantujących otrzymanie połączenia o odpowiednich właściwościach eksploatacyjnych.*

2. Bezpieczeństwo autobusów, pojazdów ciężarowych i specjalnych

Rozwój motoryzacji jest uwarunkowany równoczesnym rozwojem w zakresie bezpieczeństwa użytkowania różnego rodzaju pojazdów, w tym pojazdów ciężarowych. Zwiększająca się liczba pojazdów powoduje coraz większą możliwość wystąpienia kolizji lub wypadku. Stale prowadzone są badania mające na celu określenie parametrów związanych ze sferą materiałową, produkcją oraz naprawą pojazdów mających wpływ na właściwości eksploatacyjne oraz zachowanie danej konstrukcji podczas wypadku. Badaniami najbardziej wiarygodnymi są badania na obiektach rzeczywistych (tzw. „*Crash tests*”) jednak ich znaczne koszty ograniczają skutecznie, szerokie ich zastosowanie.

Aktualne możliwości sprzętu komputerowego oraz rozwój oprogramowania pozwalają przeprowadzać różnego rodzaju próby na wirtualnych modelach [10, 11]. Praktyka wykazuje, że przeprowadzane w ten sposób badania charakteryzują się dość znaczną korelacją wyników z wynikami uzyskanymi na drodze badań przeprowadzonych z wykorzystaniem rzeczywistych pojazdów.

Badaniom związanym z bezpieczeństwem są poddane niemalże wszystkie poruszające się pojazdy w tym również pojazdy ciężarowe. W grupie pojazdów ciężarowych szczególną uwagę zwraca się na pojazdy służące do transportu ludzi. Pojazdami takimi są autobusy, oraz pojazdy specjalistyczne służące do przewozu ludzi w kopalniach. Prowadzone są również badania typowych pojazdów ciężarowych poruszających się po drogach publicznych służących do transportu materiałów. Ograniczają się one jednak, w wielu przypadkach, do badań kabin kierowcy tego typu pojazdów [12, 13]. Taki stan rzeczy wynika z dwóch faktów. Kabina kierowcy jest miejscem gdzie znajduje się człowiek i z tego względu konstrukcja ta powinna charakteryzować się odpowiednio wysokimi parametrami plastycznymi oraz wytrzy-

małościowymi. Parametry te są poddawane ocenie podczas prowadzonych badań. Kabina stanowi również ważny element bezpieczeństwa, ponieważ jak wynika z przeprowadzonych badań najczęściej zostaje ona uszkodzona podczas różnego rodzaju zdarzeń drogowych. Ustalono, iż spośród czterech najczęściej występujących typów zdarzeń drogowych [12], w których biorą udział pojazdy ciężarowe, trzy typy zdarzeń to zdarzenia, w których bierze udział kabina kierowcy (*tablica 2*).

Tablica 2

Typy kolizji i częstotliwość ich występowania [12]

<i>Typ kolizji</i>	<i>Częstotliwość</i>
Czoło ↔ Czoło	40%
Czoło ↔ tył	35%
Czoło ↔ bok	21%
Otarcie boczne	4%

W wynikach przedstawionych w tablicy 2 dominują zdarzenia, w których dochodzi do deformacji kabiny kierowcy. Z tego też względu badania dotyczące bezpieczeństwa są skupione na kabinie pojazdu, która nie jest elementem nośnym i nie stanowi obiektu badań niniejszej pracy. Pomimo braku badań związanych z bezpieczeństwem elementów nośnych pojazdów ciężarowych są znane przypadki uszkodzeń złączy spawanych w tego typu konstrukcjach [14, 15].

Badania pojazdów do przewozu ludzi, czyli autobusów wykazują, iż elementy nośne oraz ich połączenia odgrywają bardzo istotną rolę w kwestii bezpieczeństwa. Do grupy najniebezpieczniejszych kolizji autobusu należy zaliczyć przednie lub tylne zderzenie autobusu z niekorzystnie zaprojektowaną ścianą samochodu ciężarowego oraz przewrócenie autobusu. Zaznaczyć należy, że najniebezpieczniejszą jest sytuacja, w której autobus zostaje przewrócony [16, 17]. Dochodzi wtedy do znacznych deformacji ścian bocznych oraz dachu autobusu. Równie dużym deformacjom poddawane zostają złącza spawane powszechnie wykorzystywane w budowie struktur nośnych tego typu pojazdów. Aby poznać zachowanie różnego rodzaju konstrukcji w tak niebezpiecznej sytuacji powstała dyrektywa ECE R 66, która definiuje własności wytrzymałościowe nadwozia autobusu oraz przewiduje ich kontrolę. Jednym z sposobów kontroli parametrów wytrzymałościowych konstrukcji autobusu jest przewrócenie

kompletnego autobusu. Sposób przeprowadzania próby zgodnie z wytycznymi ECE 66 przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Próba wytrzymałości konstrukcji nośnej autobusu przeprowadzona zgodnie z dyrektywą ECE R 66 [17]

Wyniki przeprowadzonych badań oraz testów wykazały, że naprężenia występujące w trakcie deformacji ustroju nośnego dachu i większości słupków okiennych w okolicy ich łączenia za pomocą złączy spawanych z pozostałymi elementami konstrukcji przekraczają wytrzymałość materiału. Pęknięcia pojawiające się w tych obszarach zmniejszają znacznie zdolność ustroju nośnego do przenoszenia obciążeń oraz tym samym są powodem powstawiania większych odkształceń, co w rezultacie stanowi duże zagrożenie dla pasażerów [16].

Drugą grupą pojazdów ciężarowych, która została wymieniona jako grupa pojazdów, których elementy nośne i ich połączenia wymagają szczególnego poziomu bezpieczeństwa są pojazdy służące do transportu ludzi w różnego rodzaju kopalniach. Pojazdy tego typu są użytkowane w bardzo specyficznych warunkach związanych z charakterem podłoża, po którym się poruszają, mogą poruszać się po drogach o znacznym nachyleniu dochodzącym nawet do 15°, oraz najechać na kawałki skał [18]. Dodatkowo w tego typu pojazdach bierze się pod uwagę możliwość ich przewrócenia oraz możliwość uderzenia w ich nadwozie odrywających się odłamków skalnych [19]. Z tego też względu, pojazdy te są wyposażane obowiązkowo w

konstrukcje chroniące operatora oraz pasażerów przed skutkami wywrócenia maszyny - konstrukcje ROPS (*Roll Over Protective Structure*) jak również chroniące operatora i pasażerów przed spadającym przedmiotem FOPS (*Falling Objects Protective Structure*). Ponieważ konstrukcje takie pełnią niezwykle odpowiedzialną funkcję, są poddawane badaniom atestatycznym prowadzonym z uwzględnieniem szeregu norm [19]. Wyniki prowadzonych badań wskazują na to, iż znaczne naprężenia zarejestrowane podczas wszelkich prób tego typu konstrukcji są zlokalizowane w okolicach połączeń elementów tworzących konstrukcję. Należy zaznaczyć, że takie konstrukcje są wytwarzane w zdecydowanej większości przypadków jako struktury spawane. W tej grupie pojazdów ciężarowych służących od przewozu ludzi połączenia spawane odgrywają bardzo istotną rolę [18].

3. Ramy pojazdów ciężarowych

Początkowo rozwój motoryzacji wiązał się z tym, że pojazdy osobowe i ciężarowe miały wiele wspólnego pod względem konstrukcyjnym. Podstawową cechą wspólną była ramowa konstrukcja nośna, na której było osadzone odpowiednio dobrane nadwozie. Jednak od pewnego momentu konstruktorzy pojazdów osobowych zdecydowali się na zmianę koncepcji i zaczęły powstawać pojazdy o nadwoziu samonośnym, które miało wiele zalet w stosunku do konstrukcji ramowej. Pojazdy ciężarowe po dzień dzisiejszy są konstruowane w oparciu o solidną ramę z mocowanymi do niej pozostałymi układami i zespołami [20]. W zależności od funkcji ramy w pojeździe ciężarowym rozróżnimy:

- ramy podwoziowe - główne,
- ramy dodatkowe:
 - ramy wywrotu,
 - ramy podkontenerowe,
 - ramy podźurawiowe,
- ramy naczep oraz przyczep.

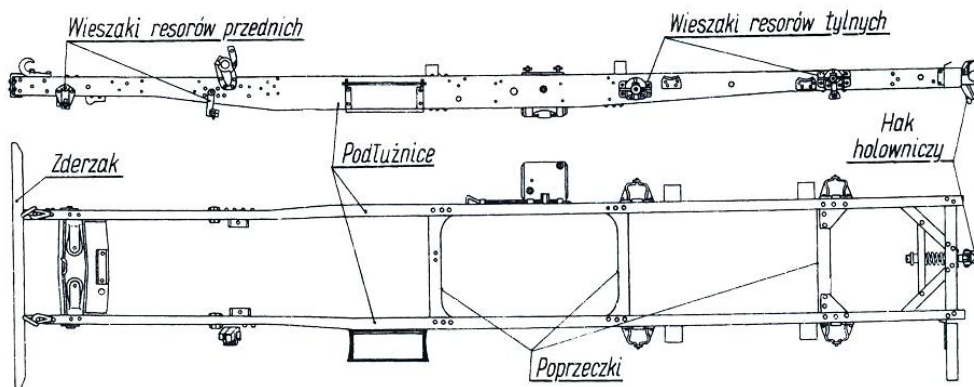
3.1. Ramy podwoziowe - główne

Zadaniem ramy głównej samochodu ciężarowego, jest zapewnienie dostatecznej sztywności całego pojazdu, przenoszenie obciążeń statycznych i dynamicznych działających na ramę oraz na poszczególne zespoły, a przy tym zapewnienie wymaganego usytuowania przestrzennego zespołów zamontowanych na ramie pojazdu i ograniczenie do minimum ich chwilowych, wzajemnych przemieszczeń. Rama samochodu ciężarowego powinna być zatem od-

powiednio elastyczna, aby wytrzymać obciążenia powodowane przez oddziaływanie nierówności drogi na koła, oraz jednocześnie odpowiednio wytrzymała, aby przenieść znaczne obciążenia pochodzące od ładunku oraz zapewniać odpowiednią ochronę osób oraz ładunku przed skutkami wypadku drogowego [21]. W zależności od kształtu rozróżniamy następujące ramy [21, 22]:

- rama podłużnicowa jest zbudowana z dwóch belek podłużnych (*podłużnic*) połączonych belkami poprzecznymi (*poprzeczkami*), w miejscach najbardziej obciążonych podłużnice mają przekrój nieco większy, mogą być wygięte w pionie lub w poziomie, w miejscach połączeń belek ramy są wzmacniane kątownikami i zastrzałami, odpowiednia liczba poprzeczek i ich kształt ułatwiają mocowanie elementów podwozia i nadwozia, zaletą ramy podłużnicowej jest prosta i tania konstrukcja, wadą zaś stosunkowo duża masa,
- rama płytowa jest wykonana zwykle w postaci płyty wytłoczonej z jednego lub połączonych ze sobą arkuszy blachy, odpowiednią sztywność ramy uzyskuje się dzięki wytłoczeniom, rama płytowa stanowi jednocześnie podłogę pojazdu. Ramy tego typu stosowane są w samochodach dostawczych i autobusach,
- rama kratownicowa stanowi przestrzenną konstrukcję spawaną lub nitowaną z cienkościennych kształtowników, ramy kratownicowe mają dużą sztywność przy stosunkowo małej masie, stosowane są zwykle jako struktura nośna autobusów,
- rama centralna zbudowana jest jako pojedynczy element o konstrukcji rurowej lub skrzynkowej ułożony wzdłuż pojazdu, rozwidlenie przedniej części ramy umożliwia zamocowanie silnika wraz ze sprzęgłem i skrzynią biegów, tylna część takiej ramy może być połączona z obudową przekładni głównej, ramy centralne są najrzadziej stosowanymi typami ram, mogą być stosowane w samochodach ciężarowo - terenowych,
- rama krzyżowa składa się z dwóch podłużnic skrzyżowanych ze sobą lub zbliżonych do siebie, rozwidlone końce są połączone mocnymi poprzeczkami, które służą do mocowania poszczególnych zespołów.

W przedstawionym podziale najczęściej stosowanym w samochodach ciężarowych rodzajem ramy jest rama podłużnicowa. Rysunek 4 przedstawia typową ramę podłużnicową wraz z zaznaczonymi jej elementami.

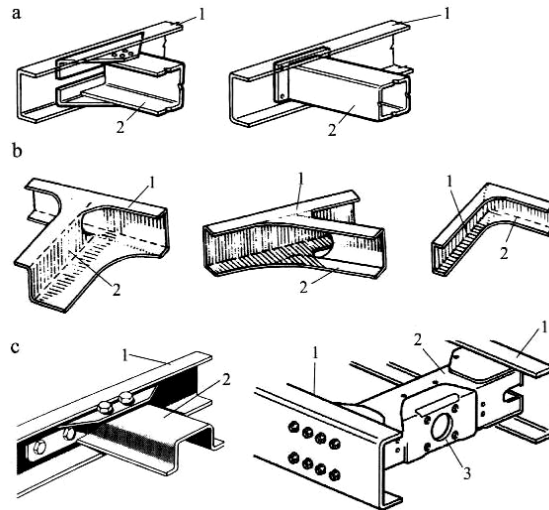


Rys. 4. Budowa ramy podłużnicowej [23]

Poza zaprezentowanym podziałem ram znajdujących zastosowanie w produkcji pojazdów ciężarowych istnieje również podział ze względu na sposób łączenia podłużnic oraz poprzeczek. Biorąc pod uwagę te kryterium rozróżnia się [21] :

- ramy, w których elementy zespolone są połączeniami nitowanymi np. ramy samochodu Scania [24],
- ramy, w których elementy zespolone są połączeniami spawanymi np. ramy naczep samowładowczych Bodex oraz Wielton [25, 26],
- ramy, w których elementy zespolone są połączeniami śrubowymi np. ramy samochodów ciężarowych Mercedes.

Na rysunku 5 przedstawiono typowe połączenia elementów ram pojazdów ciężarowych.



Rys. 5. Typowe połączenia poprzeczek i podłużnic w ramach nośnych pojazdów ciężarowych
 a) poprzeczki przynitowane do podłużnic (*SCANIA*), b) poprzeczki przyspawane do podłużnic,
 c) poprzeczka przykręcana do podłużnic (*VOLVO*), 1- podłużnica, 2- poprzeczka, 3- miejsce
 mocowania urządzenia sprzęgającego samochód z przyczepą [23]

Jak przedstawiono na rysunku 5, często stosowanymi połączeniami elementów ram pojazdów ciężarowych, poza połączeniami śrubowymi i nitowanymi, są połączenia spawane.

3.2. Ramy dodatkowe

Wiele zabudów pojazdów ciężarowych wymaga zastosowania dodatkowej ramy, która ma na celu, np. przejście część naprężeń wynikających z warunków eksploatacji. Pojazdy tego typu określa się mianem pojazdów z zabudowami specjalnymi [27]. Ramy służące do tego typu zabudów w zależności od rodzaju i przeznaczenia pojazdu można podzielić na [28]:

- ramy wywrotu,
- ramy podkontenerowe,
- ramy podźurawiove.

Oprócz przedstawionego podziału ram dodatkowych w pojazdach ciężarowych stosuje się również ramy dedykowane pod konkretne zastosowania, np. ramy dodatkowe zastosowane w przypadku budowy samochodu lawety lub też holownika ciężkich pojazdów [28÷30].

Podział pod względem budowy ram dodatkowych zwanych również pośrednimi jest analogiczny jak w przypadku ram podwoziowych. Zdecydowana większość ram wywrotu i podkontenerowych budowana jest jako ramy podłużnicowe, w których elementy ramy spawane są za pomocą spawania. Inaczej konstruowane są ramy podźurawiove, które często wy-

konywane są jako tzw. ramy szcztawkowe, niepozwalające sklasyfikować się przy użyciu tradycyjnych podziałów.

Istotną rolę w układzie rama główna - rama pośrednia odgrywa sposób połączenia obydwu tych ram. Zasadniczo stosowane są trzy sposoby łączenia podłużnic rami głównej z podłużnicami rami pośredniej [28]:

- połączenie za pomocą złączy jarzmowych,
- połączenie za pomocą płyt stalowych, przykręcanych śrubami,
- połączenie za pomocą wsporników łączonych śrubami.

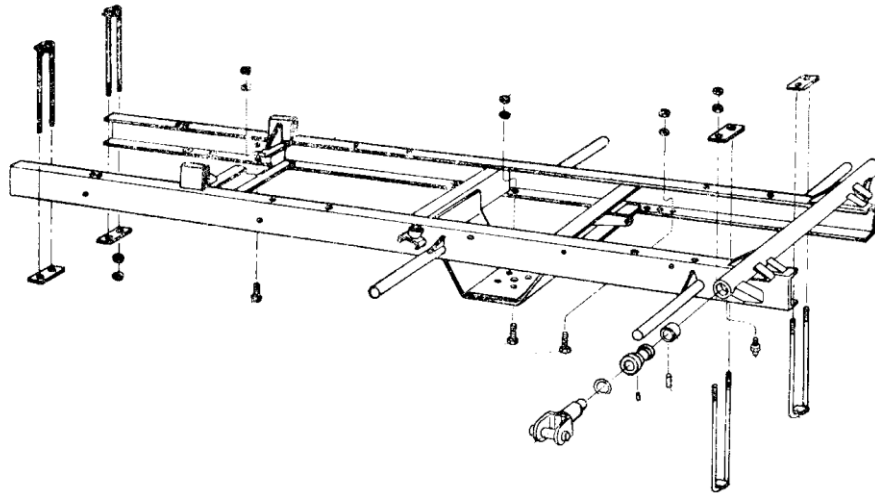
Jak wynika z powyżej przedstawionego podziału, wszystkie sposoby łączenia ram pośrednich z ramami głównymi posiadają jedną wspólną cechę są to połączenia śrubowe w różnej postaci. Połączenia takie stosowane są ze względu na to, iż są one połączeniami rozłącznymi. Rami pośrednie w wielu przypadkach wykonywane jako konstrukcje spawane są najbardziej obciążonymi elementami ustroju nośnego i dlatego najczęściej ulegają uszkodzeniom. Ekonomicznie uzasadnionym wyborem połączenia jest wybór połączeń rozłącznych, które w przypadku konieczności wymiany zniszczonych elementów rami pośredniej znacząco obniżają koszt naprawy.

Inaczej wygląda kwestia budowy ram pośrednich gdzie bardzo ważną techniką łączenia elementów tych ram jest spawanie [27÷29]. Tylko niektóre z opisywanych ram pośrednich, zgodnie z obowiązującym prawem muszą być wykonane pod nadzorem Urzędu Dozoru Technicznego [32].

3.2.1. Rami wywrotu

Rama samochodu ciężarowego, samowyladowczego potocznie zwanego „wywrotką” jest najbardziej obciążonym elementem spośród wszystkich elementów podwozia oraz całego pojazdu. Przeciętne warunki pracy samochodu samowyladowczego są znacznie trudniejsze od tych, w jakich pracują uniwersalne samochody ciężarowe. Jest to głównie spowodowane tym, iż samochody samowyladowcze obsługują różnego rodzaju budowy, do których dojazd często odbywa się drogami gruntowymi [28]. Ruch taki zwłaszcza w przypadku przemieszczania się samochodu obciążonego wywołuje znacznie większe obciążenia dynamiczne oraz powoduje większe kąty skręcania rami [33]. W celu zmniejszenia momentów gnących działających na ramę główną samochodu samowyladowczego stosowane są różnego rodzaju zabiegi np. stosowanie mniejszych rozstawów osi kół jezdnych. Zabiegi takie nie zawsze są wystarczające do zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości i sztywności rami. Przystosowanie rami głów-

nej do zabudowy samowyładowczej skrzyni wymaga zastosowania specjalnych wzmocnień w miejscach szczególnie obciążonych lub też zastosowania dodatkowej ramy – tzw. ramy wywrotu [28]. Rysunek 6 przedstawia przykładową ramę wywrotu wywrotki tylnozsypowej o ładowności 4,5 t.



Rys. 6. Rama wywrotu samochodu o ładowności 4,5 t [28]

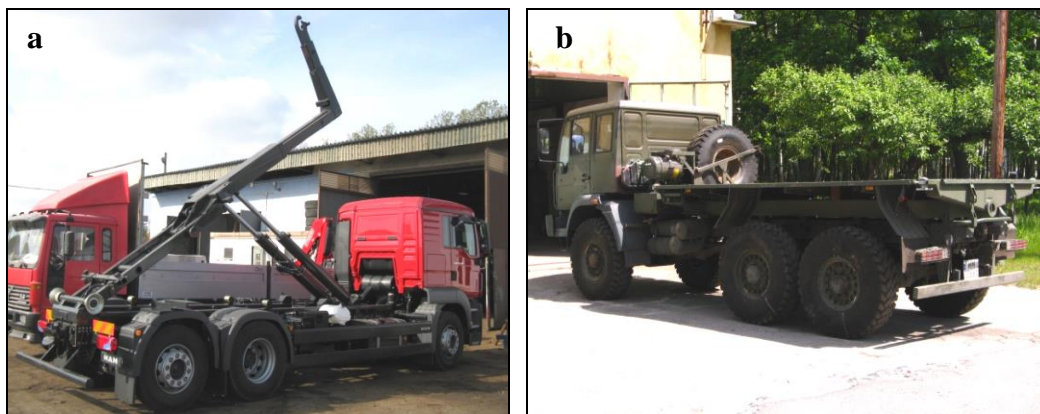
Ramy wywrotu wykonuje się w zdecydowanej większości jako spawane ramy podłużnicowe, wykonane z profili o przekroju ceowym. Rzadziej spotykane są ramy wykonane z profili o przekroju prostokątnym zamkniętym. Wysokość profilu podłużnicy ramy wywrotu powinna być tak dobrana, aby w miejscach występowania największych momentów gnących, wartość naprężeń nie przekraczała 300 MPa [28].

3.2.2. Ramy podkontenerowe

Ważnym wymogiem stawianym pojazdom ciężarowym jest zapewnienie możliwości przewozu pewnych zunifikowanych ładunków. Ładunkami takimi są np. kontenery o różnych długościach [34]. Przystosowanie pojazdu ciężarowego do przewozu tego typu ładunków wymaga zastosowania ramy podkontenerowej, która w zdecydowanej większości przypadków jest konstrukcją spawaną. Ramy takie budowane są w wersjach:

- samozaładowczej z tzw. urządzeniem hakowym lub łańcuchowym,
- bez takich urządzeń.

Przykłady ram podkontenerowych zabudowanych na ramach głównych pojazdów ciężarowych przedstawiono na rys. 7.

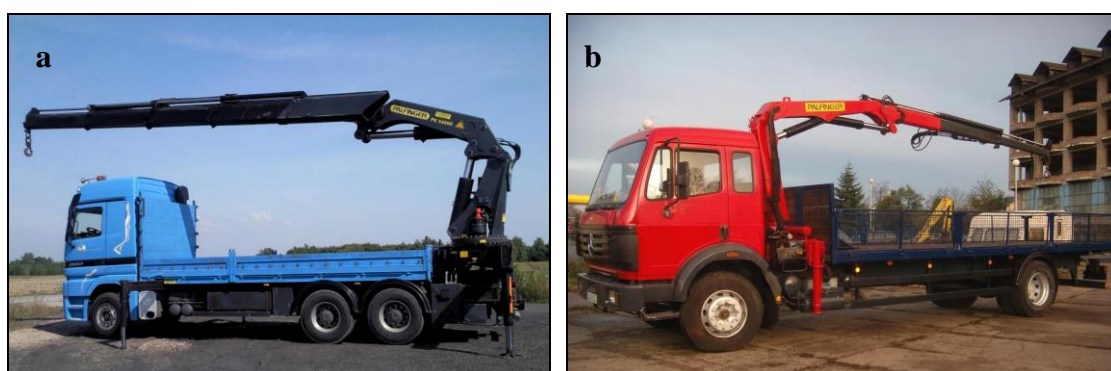


Rys. 7. Pojazdy z zabudowanymi ramami podkontenerowymi : a) z hakowym urządzeniem samozaładowczym, b) bez urządzenia samozaładowczego

3.2.3. Ramy podźurawiowe

Problemem technicznym jest zabudowanie na ramie głównej pojazdu ciężarowego żurawia, który stanowi obciążenie przyłożone na niewielkiej powierzchni. Obciążenie takie w wielu przypadkach zlokalizowana jest za tylnym zwisem ramy głównej lub za kabiną kierowcy [35, 36]. Tego typu zabudowa najczęściej wymaga zastosowania pewnej, dodatkowej ramy, tzw. ramy podźurawiowej. Konieczność zastosowania takiej ramy wynika z faktu, iż miejsce gdzie żuraw jest zabudowany charakteryzuje się znacznymi naprężeniami oraz tym samym jest miejscem potencjalnego uszkodzenia ramy głównej. Ciężar żurawia samochodowych może dochodzić do 2 ton (oraz dodatkowo obciążenie wynikające z masy unoszonego ładunku), natomiast środek ciężkości takich urządzeń może znajdować się około 0,7 m nad rama główną [35].

Ramy tego typu montowane są zależnie od, wielkości żurawia, ładowności samochodu, jego wielkości za kabiną kierowcy lub też za tylną osią (rys. 8).



Rys. 8. Pojazdy z zabudowanymi żurawiami: a) żuraw zabudowany za tylną osią jezdnią pojazdu, b) żuraw zabudowany za kabiną kierowcy

Ramy pośrednie służące do zabudowy żurawia ze względów ekonomicznych wykonywane są w większości przypadków jako konstrukcje spawane. Jest to jeden z nielicznych przypadków konstrukcji spawanych znajdującej się w pojeździe ciężarowym, który podlega kontroli Urzędu Dozoru Technicznego. Wykonanie tego typu ramy, jej montaż, ewentualna naprawa wymagają uzyskania tzw. dopuszczenia Urzędu Dozoru Technicznego [32, 37].

3.3. Ramy przyczep i naczep samochodowych

Osobną grupę konstrukcji stanowią ramy pojazdów nieposiadających własnego silnika oraz przystosowanych do ruchu wraz z innym pojazdem ciągnącym. Konstrukcjami takimi są konstrukcje ram nośnych różnego rodzaju przyczep oraz naczep samochodowych. Podział naczep oraz przyczep samochodowych jest obszerny [21, 27, 39, 40]. Rozróżnia on min. przyczepy oraz naczepy o zastosowaniu uniwersalnym, do przewozu dłuźcy, do przewozu materiałów sypkich, przyczepy oraz naczepy najazdowe - niskopodłogowe itd. [21].

Ramy niemalże wszystkich typów naczep oraz przyczep wykonywane są jako ramy podłużnicowe. Ramy przyczep oraz naczep wykonywane są głównie jako konstrukcje spawane.

4. Materiały stosowane do budowy ram

Materiały stosowane do wytwarzania ram powinny charakteryzować się odpowiednio dużą wytrzymałością na obciążenia statyczne oraz dynamiczne, odpornością na zróżnicowane warunki pracy, w trakcie eksploatacji pojazdów. Ramy powinny być wykonane z materiałów łatwo obrabialnych, odpornych na korozję oraz łatwo spawalnych. Z powyższych względów ramy wykonują się najczęściej ze stali niskostopowych o podwyższonej wytrzymałości głównie w gatunku 18G2 oraz 18G2A wg. EN: S355J2G3 [9÷11, 28, 35, 41, 42÷46]. Grubość blachy, z której wykonują się elementy poprzeczne oraz podłużnice, zależy od ich kształtu, przekroju oraz przeznaczenia.

4.1. Stale niskostopowe o podwyższonej wytrzymałości

Stale niskostopowe o podwyższonej wytrzymałości zaczęto stosować do konstrukcji spawanych na przełomie lat 1940-1950, a podstawowym składnikiem stopowym był mangan (*do 2%*), krzem (*do 0,5%*) oraz węgiel (*0,18%*), podwyższające wytrzymałość na rozciąganie R_m stali do ok. 360 MPa. Obecnie wytwarzane stale tej grupy o obniżonych zawartościach siarki, fosforu i węgla z mikrodotatkami Nb i V w celu zwiększenia granicy plastyczności, osiągają wartość $R_m = 560$ MPa. Wprowadza się też dodatek miedzi (*do ok. 0,5%*) dla zwiększenia

szenia odporności na korozję atmosferyczną. Często stale te nazywa się w skrócie C-Mn lub SSPW (*spawalne stale o podwyższonej wytrzymałości*). Dalsze podwyższanie wytrzymałości przez zwiększenie zawartości manganu powoduje pogorszenie spawalności, przejawiającej się zwiększoną twardością w SWC (*strefie wpływu ciepła*) i skłonnością do pęknięcia na zimno [80].

Elementy konstrukcji wykonane ze stali o podwyższonej wytrzymałości mogą w stosunku do elementów wykonanych ze stali niestopowych (*węglowych*) przenosić te same obciążenia przy mniejszych przekrojach. Zastosowanie stali o podwyższonej wytrzymałości w budowie ram pojazdów ciężarowych umożliwia, zmniejszenie masy konstrukcji.

W tradycyjnej klasyfikacji stali stosowanych w Polsce, a także w większości krajów europejskich, w grupie stali SSPW znajdują się również stale drobnoziarniste o różnym stanie obróbki cieplno-chemicznej, np. normalizowane, ulepszone cieplnie i termomechanicznie. W klasyfikacji według Norm Europejskich stale typu C-Mn zalicza się do stali niestopowych, w większości przypadków tzw. stali jakościowych (*PN-EN 10025*) [48,49].

Stale konstrukcyjne o podwyższonej granicy plastyczności dzielimy na [80]:

- stale o strukturze ferrytyczno-perlitycznej, w których podwyższenie wytrzymałości uzyskuje się przez zwiększenie udziału perlitu, rozdrobnienie ziarna ferrytu lub wprowadzenie pewnych pierwiastków i uzyskanie wydzielen w roztworze stałym, zwiększających umocnienie,
- stale o strukturze bainitycznej lub martenzytycznej, ulepszone cieplnie, w których podwyższenie wytrzymałości uzyskuje się m.in. przez wprowadzenie do nich minimalnych ilości boru.

Stale typu C-Mn są reprezentowane w kraju przez gatunki: 09G2, 09G2Cu, 15GA, 18G2, 18G2A i 18G2ACu. Charakteryzują się one strukturą ferrytyczno-perlityczną. Perlit w spoinie łatwo przemienia się podczas szybkiego chłodzenia w martenzyt, fazę powodującą pęknięcia, co jest najistotniejszym problemem spawalności niskostopowych stali konstrukcyjnych. Elementy grube należy, podgrzewać przed spawaniem i stosować wysoką energię liniową spawania [50]. Skład chemiczny oraz właściwości stali najczęściej używanej do produkcji ram pojazdów ciężarowych zestawiono w tablicy 3.

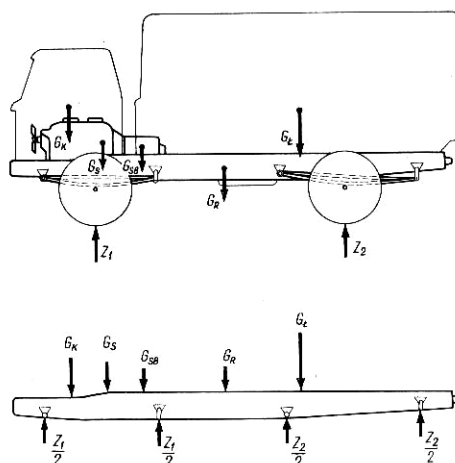
Skład chemiczny i właściwości stali S355J2G3 [48]

Nazwa Stali		Własności mechaniczne				Skład chemiczny				
wg EN	wg PN	Kategoria wytrzymałości	Odmiana plastyczności	R _m , MPa	Moduł Younga, GPa	C, %	Mn, %	Si, %	P max, %	S max, %
S355J2G3	18 G2A	E 355	C, D, U, R, S, J	490÷630	210	0,2	1,45	0,51	0,035	0,035

5. Naprężenia w ramach pojazdów ciężarowych

Ustalenie związku pomiędzy siłami obciążającymi ramę, a pojawiającymi się w niej naprężeniami jest zadaniem stosunkowo trudnym [51]. Do niedawna stosowano jedyną metodę polegającą na miejscowym pomiarze naprężeń metodami tensometrycznymi. Rozwój techniki komputerowej oraz oprogramowania pozwala na teoretyczną analizę naprężeń pojawiających się w poszczególnych częściach ram samochodów ciężarowych, bez potrzeby prowadzenia kosztownych badań.

Stan obciążenia ramy samochodu jest bardzo złożony, a wartość i kierunek działających na nią obciążeń dynamicznych zależą od chwilowych warunków ruchu. Skomplikowane obliczenia ram wykonuje się z wykorzystaniem technik komputerowych, tzw. metodą elementów skończonych (*MES*). Badania takie są często weryfikowane poprzez przeprowadzenie pomiarów tensometrycznych na obiekcie rzeczywistym. Orientacyjne wartości naprężeń uzyskać można w wyniku uproszczonych obliczeń wytrzymałościowych podłużnic z uwzględnieniem tylko obciążeń statycznych. Podłużnicę traktuje się przy tym jako belkę, na którą działają siły ciężkości mocowanych do ramy zespołów oraz nadwozia (*rys. 9*). Siły te są równoważone przez reakcje pionowe, działające na ramę od strony jezdni w punktach zamocowania resorów.



Rys. 9. Obciążenie ramy pojazdu ciężarowego, obciążenie statyczne działające na ramę oraz schemat obliczeniowy [23]

Naprężenia w poszczególnych przekrojach ramy, można wyznaczyć, jako iloraz momentu zginającego w tym przekroju M_{gx} i podwojonego wskaźnika wytrzymałości podłużnicy W_x [9].

$$\sigma_x = \frac{M_{gx}}{2W_x} \quad (1)$$

gdzie:

σ - naprężenia zginające w przekroju x ,

M_{gx} - moment zginający,

W_x - wskaźnik wytrzymałości na zginanie.

Moment zginający M_{gx} można określić analitycznie lub wykreślnie, zgodnie ze znanymi z mechaniki zasadami obliczania belek. Moment dla popularnego dla podłużnic samochodowych przekroju dwuteowego określony jest wzorem 2.

$$W_x = \frac{BH^3 - bh^3}{6H} \quad (2)$$

gdzie:

W_x - wskaźnik wytrzymałości na zginanie (*oś OX jest osią obojętną*),

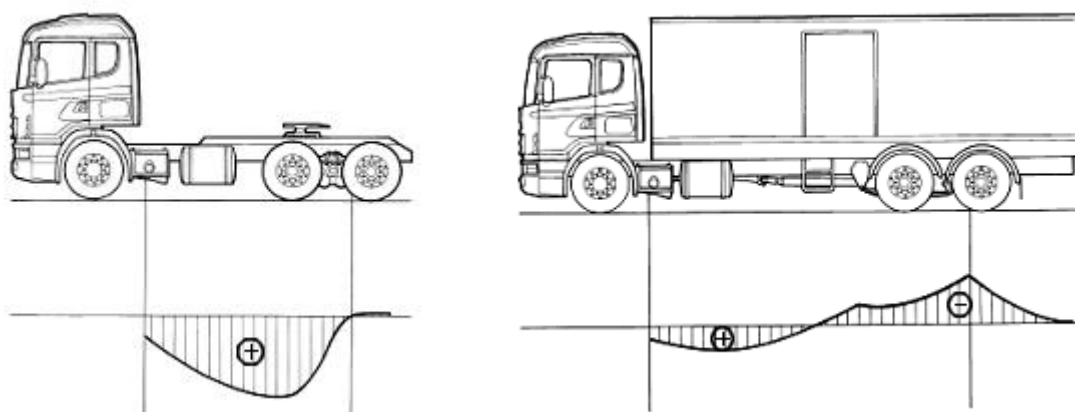
H - wysokość przekroju,

h - wysokość środka,

B - szerokość przekroju,

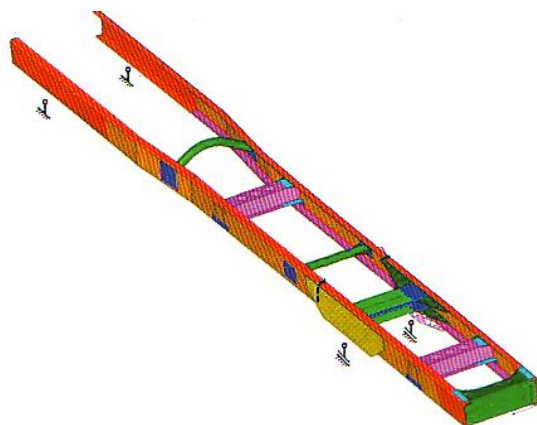
b - szerokość półek pomniejszona o szerokość środka.

Wyniki tak przeprowadzonych obliczeń wskazują tylko ogólnie na wartość naprężeń pojawiających się w ramach i należy je traktować jako orientacyjne. Obliczenia te nie uwzględniają poprzeczek wchodzących w skład typowych, a zarazem najczęściej stosowanych ram podłużnicowych [10, 11, 51]. Brak jest również uwzględnienia występowania tak zwanych węzłów, czyli miejsc łączenia elementów ram [10, 11]. Przykładowe wyniki obrazujące zmiany wielkości momentów gnących w podłużnicach uzyskane w wyniku obliczeń uproszczonych zaprezentowano na rys. 10.



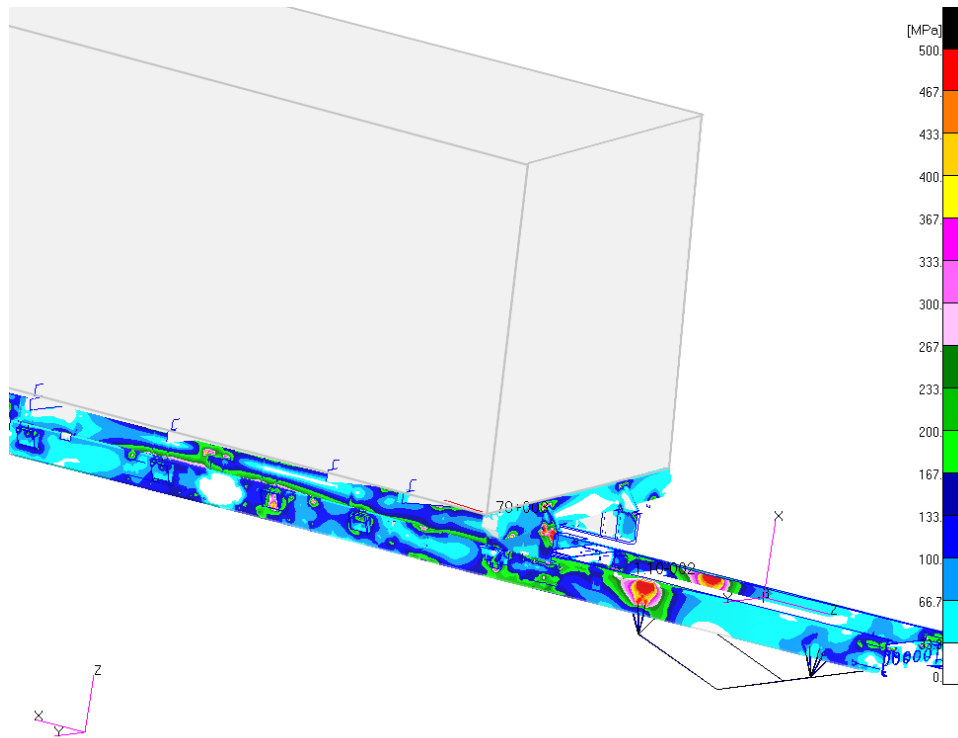
Rys. 10. Przykładowe przebiegi momentów gnących w elementach ram nośnych pochodzących od sił statycznych [53]

Znacznie dokładniejszą analizą stanu naprężeń ram samochodów jest przeprowadzenie numerycznej symulacji z użyciem programu MES. Przed przeprowadzeniem tego etapu analizy konieczne jest wykonanie modelu geometrycznego ramy [12]. Przykład modelu geometrycznego ramy samochodu ciężarowego przedstawiono na rysunku 11.



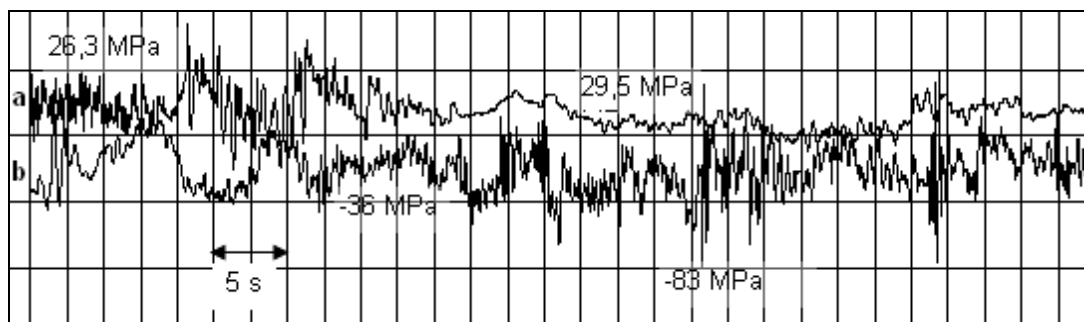
Rys. 11. Model geometryczny ramy pojazdu ciężarowego [51]

Wykonany model lub jego wybrane części poddane zostają analizie numerycznej z użyciem programu komputerowego wykorzystującego metodę elementów skończonych. Przykładowe wyniki takich analiz przedstawiono na rysunku 12, który przedstawia warstwy naprężeń zredukowanych występujących w ramie pojazdu ciężarowego.



Rys. 12. Warstwy naprężeń zredukowanych wg. hipotezy Hubera-Misesa [53]

Wyniki uzyskane na drodze analizy numerycznej często są weryfikowane poprzez przeprowadzenie pomiarów tensometrycznych, w miejscach wskazanych przez wyniki z programu komputerowego MES jako najbardziej wyężone. Przykładowy wykres uzyskany na drodze pomiarów tensometrycznych przedstawiono na rys. 13. Jest to wykres zmian naprężeń zarejestrowany na elementach ramy nośnej samochodu ciężarowego STAR poruszającego się z prędkością 40 km/h po nawierzchni wykonanej z bruku.

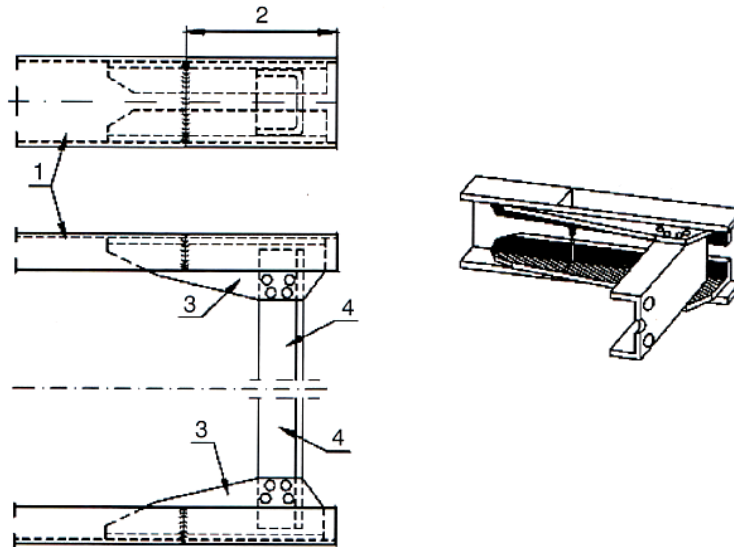


Rys.13. Zmiany wartości naprężeń zarejestrowane na elementach ramy pojazdu ciężarowego
 a- pomiar pomiędzy pierwszą a drugą poprzeczką ramy, b- pomiar pomiędzy wspornikami
 przedniego resoru [56]

Z przedstawionego wykresu można odczytać naprężenia w standardowej ramie samochodu ciężarowego jadącego z niewielką prędkością 40 km/h po stosunkowo równej nawierzchni. Naprężenia w ramie są na poziomie 80 MPa.

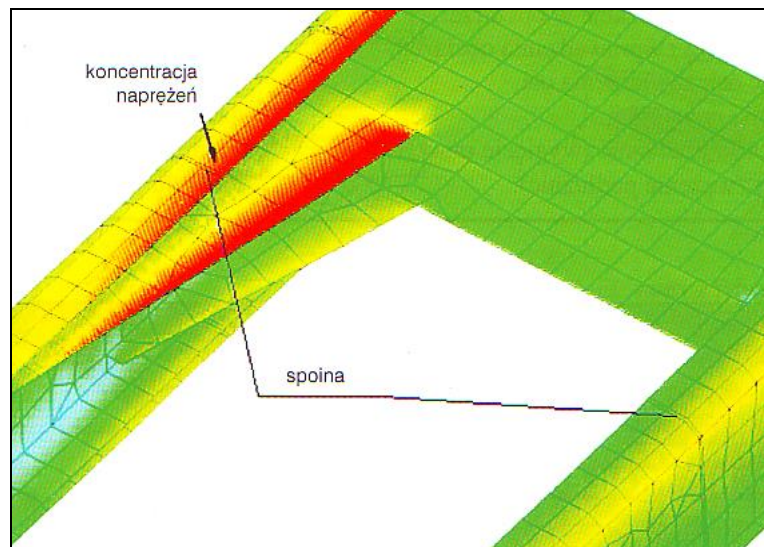
Wyniki do tej pory prezentowane obrazowały wielkość naprężeń w ramach typowych, bez jakichkolwiek modyfikacji. Często zdarza się, że zachodzi potrzeba przebudowy samochodu produkowanego seryjnie. Niejednokrotnie przebudowa taka wiąże się z koniecznością ingerencji w strukturę nośną pojazdu. Przykładem takiej przebudowy pojazdu jest wydłużenie ramy nośnej dla potrzeb budowy pojazdu samowyładowczego [51, 56]. Przebudowy tego typu wykonywane są przeważnie z użyciem metod spawalniczych.

Miejsce występowania złącza spawanego staje się jednym z najsilniej wyciężonych miejsc w ramie samochodu. Sposób przedłużenia ramy samochodu oraz wyniki przeprowadzonych statycznych analiz z użyciem programu MES przedstawiono na zamieszczonych rysunkach 14 i 15.



Rys. 14. Sposób zwiększenia długości ramy nośnej

1- podłużnica ramy samochodu, 2- odcinek przedłużenia ramy, 3- węzłówka lub kątownik wzmacniający, 4- poprzeczka tylna [53]



Rys.15. Rozkład naprężeń w miejscu występowania złącza spawanego w ramie nośnej pojazdu ciężarowego [53]

Zatem miejsce, w którym znajduje się połączenie spawane staje się miejscem koncentracji naprężeń tzw. koncentratorem naprężeń.

Przedstawione wielkości zarejestrowanych naprężeń w elementach nośnych pojazdów ciężarowych dotyczyły typowej eksploatacji. Zaznaczyć jednak należy, iż pojazdy ciężarowe eksploatowane są również w nietypowych (*ciężkich*) warunkach np. terenowych, gdzie występujące w ramach wartości naprężeń znacznie przewyższają te, które obserwuje się w warunkach postoju lub typowej eksploatacji [57÷61].

Istotne jest również to, że warunki eksploatacji pojazdów ciężarowych bywają na tyle „trudne”, że naprężenia pojawiające się w elementach ramy są większe od wytrzymałości ramy i dochodzi do jej odkształcenia [122, 123].

6. Warunki eksploatacji ram pojazdów ciężarowych

Praca ramy pojazdu ciężarowego związana jest z występowaniem złożonych warunków eksploatacji. Samochód ciężarowy, podczas eksploatacji poddawany jest znacznym obciążeniom dynamicznym, statycznym oraz zmęczeniowym [28, 33, 51, 57, 58]. Obciążenia te są wynikiem warunków ruchu, w jakich samochód, może być używany.

Warunkami, w jakich eksploatowane są pojazdy mogą być np. jazda ze znacznymi prędkościami po nierównych nawierzchniach dróg, gwałtowne hamowanie, impulsy siły związane z załadunkiem lub rozładunkiem pojazdu [125]. Warunki te generują powstawanie dużych momentów sił o charakterze uderzeń. Z tego też względu jedną z ważniejszych cech, jaką powinna charakteryzować się rama nośna pojazdu ciężarowego jest odpowiednio wysoka udarność.

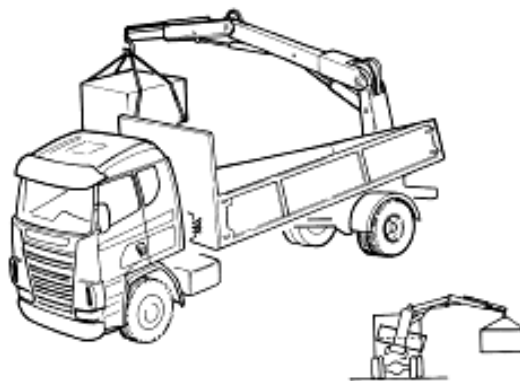
Rama pojazdu jest poddawana również w czasie eksploatacji obciążeniom statycznym. Obciążenie statyczne ramy nośnej pojazdu ciężarowego występuje w każdych warunkach eksploatacji (*nawet w warunkach postoju pojazdu*). Obciążenie takie może pochodzić, np. od ładunku znajdującego się w przestrzeni ładunkowej pojazdu.

Warunki eksploatacji pojazdów ciężarowych mogą być na tyle ciężkie, iż generujące się podczas eksploatacji obciążenia oraz wynikające z nich naprężenia w ramie mogą powodować odkształcenie struktury nośnej pojazdu. Obciążenia powodujące odkształcenia mogą posiadać różny charakter. Podczas wypadku obciążenia posiadają charakter dynamiczny. Innym przypadkiem jest sytuacja związana z obciążeniami występującymi podczas rozładunku naczep samowyładowczych przewidzianych do przewozu materiałów sypkich. Podczas rozładunku środek ciężkości naczepy znajduje się na znacznie większej wysokości niż znajduje się on, gdy naczepa jest opuszczona oraz przystosowana do jazdy. Podczas rozładunku nawet niewielki impuls siły bocznej, pochodzącej np. z nierówności nawierzchni może powodować utratę stabilności konstrukcji oraz jej zniszczenie. Producenci naczep zabraniają z tego powodu rozładunku naczep na nierównym lub miękkim podłożu (*rys. 16*).



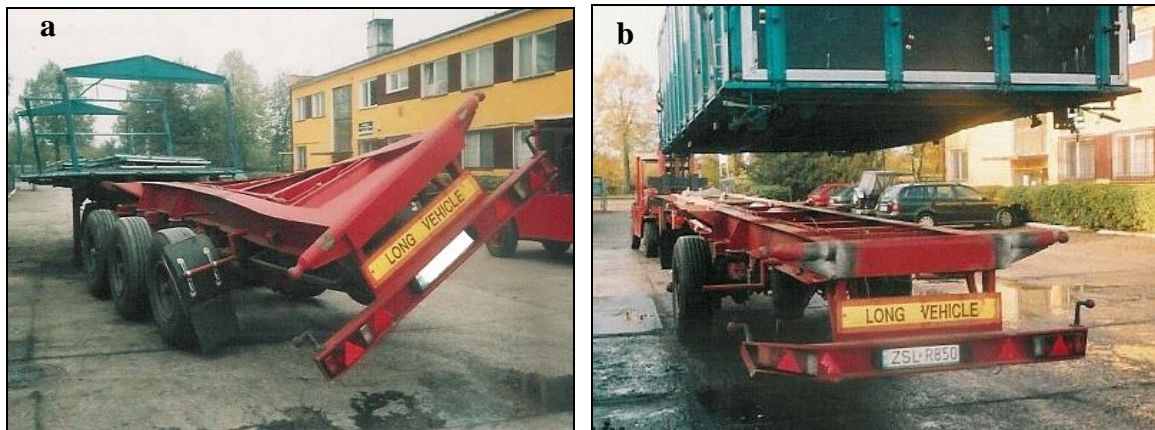
Rys. 16. Zalecenia producenta naczep samochodowych odnośnie ich rozładunku [126]

Obciążenie powodujące odkształcenie ramy w opisanym przypadku ma charakter zdecydowanie statyczny. Odkształcenie ramy pojazdu ciężarowego pod wpływem sił statycznych może wystąpić podczas rozładunku pojazdu za pomocą żurawia typu HDS. Zbyt duże obciążenie przeniesione znacznie poza oś symetrii pojazdu może również spowodować odkształcenia ramy pojazdu polegającego na jej skręceniu. Sytuację taką przedstawiono na zamieszczonym rysunku 17.



Rys. 17. Odkształcenie ramy nośnej pojazdu ciężarowego na skutek działania sił o charakterze statycznym [123]

Odkształcone ramy pojazdów ciężarowych w wielu przypadkach poddaje się naprawie polegającej na statycznym prostowaniu z użyciem odpowiednich pras [123, 124]. Prostowanie takie ma za zadanie doprowadzenie wymiarów geometrycznych ramy do stanu sprzed odkształcenia. Odkształconą naczepę przed oraz po naprawie polegającej na statycznym prostowaniu przedstawiono na rysunku 18.



Rys. 18. Uszkodzona naczepa samochodowa a- przed i b- po naprawie [122]

W ramach pojazdów ciężarowych poza występowaniem znacznych impulsów sił podczas eksploatacji występują siły i wynikające z nich naprężenia znacznie mniejsze, jednak bardzo często powtarzające się w czasie. Siły i wynikające z nich naprężenia mogą być powodem pojawiania się pęknięć zmęczeniowych. Uszkodzenia tego typu należy uznać za powszechne i będące częstym powodem przejścia spawanej ramy w stan niezdatności eksploatacyjnej.

Stwierdzić należy, że warunki pracy ramy pojazdu ciężarowego są warunkami złożonymi. Rama jest poddawana w czasie eksploatacji obciążeniom o charakterze dynamicznym oraz statycznym, przy czym obciążenia te mogą być na tyle duże, że powodują znaczne odkształcenie struktury nośnej pojazdu [122, 124]. Dodatkowo niemalże każde warunki ruchowe pojazdu ciężarowego powodują powstawanie naprężeń, mogących być źródłem pęknięć zmęczeniowych.

7. Naprawy ram pojazdów metodami spawalniczymi

Zastosowanie spawania do naprawy ram pojazdów ciężarowych jest powszechne. Z dostępnych instrukcji napraw pojazdów ciężarowych wydanych przez wiodących producentów wynika, że dopuszczają oni spawanie między innymi w celu usunięcia różnego rodzaju pęknięć znajdujących się w elementach ram [62÷64]. Proces spawania jest zalecanym procesem w przypadkach różnego rodzaju dozwolonych modyfikacji np. wydłużenia ramy. Ze względu na fakt, iż naprawy i modyfikacje ram prowadzone z użyciem procesów spawania są zabiegami bardzo odpowiedzialnymi, od których zależało również bezpieczeństwo użytkownika takiego pojazdu, producenci pojazdów ciężarowych w swoich instrukcjach zawierają dokładne wytyczne odnośnie procesu. Wytycznymi tymi są objęte: metoda spawania, rodzaj

materiału dodatkowego, sposób przygotowania krawędzi elementów spawanych oraz wymagania dotyczące odpowiednich uprawnień dla osób wykonujących proces spawania [62÷64].

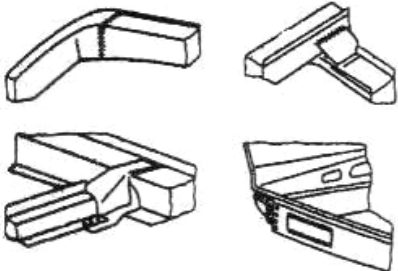
7.1. Naprawa ram

Podczas użytkowania pojazdu ciężarowego rama może ulec uszkodzeniu w wyniku normalnej eksploatacji lub wypadku drogowego. Naprawa ramy polega na jej prostowaniu, spawaniu pęknięć oraz zabezpieczeniu poluzowanych połączeń. Przed podjęciem decyzji o naprawie koniecznym jest zapoznanie się z podanymi przez producenta zasadami dotyczącymi dopuszczalnego zakresu naprawy ramy. Niektórzy producenci samochodów dopuszczają naprawy ramy z użyciem procesów spawalniczych bez żadnych ograniczeń [65÷70]. Inni producenci dopuszczają tzw. naprawę częściową (np. *wymianę fragmentu uszkodzonej ramy z użyciem metod spawalniczych*). Są też producenci, którzy w ogóle nie dopuszczają możliwości naprawy ram metodami spawalniczymi [42], jednak dopuszczają spawanie w obrębie ramy w celu jej modyfikacji (np. *przedłużenia*) [24, 42, 62].

Jak wynika z opublikowanych przez producentów pojazdów ciężarowych instrukcji napraw oraz modyfikacji, do napraw uszkodzonych elementów pojazdów metodami spawalniczymi zaleca się stosowanie spawania elektrycznego, a w szczególności spawania ręcznego elektrodami otulonymi z użyciem elektrod zasadowych [42, 63, 64], elektrod rutytowych [65÷70], oraz spawanie w osłonie mieszanek gazowych topliwą elektrodą metalową (*MIG/MAG*) [41, 62, 63].

Zestawienie najpopularniejszych metod spawalniczych do napraw oraz przebudów ram pojazdów ciężarowych zamieszczono w tablicy 4.

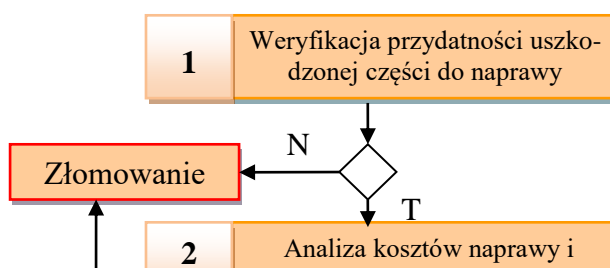
Zestawienie najczęściej stosowanych metod naprawy [71]

Zespoły konstrukcyjne	Stosowane stale	Metody łączenia	Wskazówki przy naprawach
<p>Elementy podwozia</p> 	08X	Zgrzewanie punktowe, spawanie metodą MAG w mieszankach Ar-CO ₂ , spawanie elektrodami otulonymi, zgrzeiny punktowe, spoiny ciągłe lub przerywane, spoiny otworowe	Wykorzystać zgrzewarki kleszczowe, urządzenia MAG, druty elektrodowe Ø0,6 lub Ø0,8, spawarki prostownikowe, elektrody Ø2 lub Ø2,5. w przypadku stali 08 i St3 stosować elektrody rutowe, np. typu ER3.46, a przy stalach 15G2A, 18G2, elektrody zasadowe suszone typu EB1.46
	St3S		
	16H		
	15G2A		
	S355J2G3 (18G2)		

Naprawioną ramę sprawdza się postępując podobnie jak przy wykrywaniu jej uszkodzeń, przestrzegając zasad podanych przez producenta pojazdu. Po naprawie należy wykonać pomiary geometrii ramy na zgodność z warunkami dopuszczalnymi [72].

7.2. Aspekty techniczne i ekonomiczne naprawy

Bardzo często do naprawy ram pojazdów ciężarowych są wykorzystywane metody spawania, przy czym rozpoczęcie naprawy powinno być poprzedzone analizą aspektów technicznych i ekonomicznych [71]. Aspekty techniczne to przede wszystkim weryfikacja uszkodzenia i stwierdzenie przydatności części do naprawy, a następnie wybór metody naprawy, materiałów dodatkowych i przygotowanie dokumentacji naprawy. Aspekty ekonomiczne sprowadzają się do oceny kosztów naprawy i porównanie tych kosztów z ceną części nowej [71]. Czynności niezbędne przy analizie aspektów technicznych i ekonomicznych można przedstawić w postaci algorytmu przedstawionego na rys. 19.



Rys. 19. Schemat czynności związanych z naprawą uszkodzonej części, decyzja pozytywna (T) lub negatywna (N) [71]

Przy podejmowaniu decyzji o przydatności części do naprawy należy rozważyć informacje ogólne dotyczące, rodzaju pojazdu i sposobu uszkodzenia, oraz informacje szczegółowe, m.in.[71]:

- rodzaj uszkodzonej części,
- materiał uszkodzonej części,
- masa, wielkość i kształt części,
- rodzaj uszkodzenia,
- "historia" eksploatacji uszkodzonej części.

Analiza kosztów naprawy (*zależność 1*) sprowadza się do porównania kosztów naprawy K_R z kosztami części nowej K_N :

$$K_R * z \leq K_N \quad (3)$$

gdzie:

K_R – koszt naprawy części,

K_N – koszt części nowej,

z - współczynnik jakości, gdy $z = 1$ jakość naprawianej części odpowiada jakości części nowej.

Koszty naprawy K_R części obejmują:

$$K_R = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 \quad (4)$$

gdzie:

K_1 – koszty przygotowania naprawianej części,

K_2 – koszty wykonania naprawy,

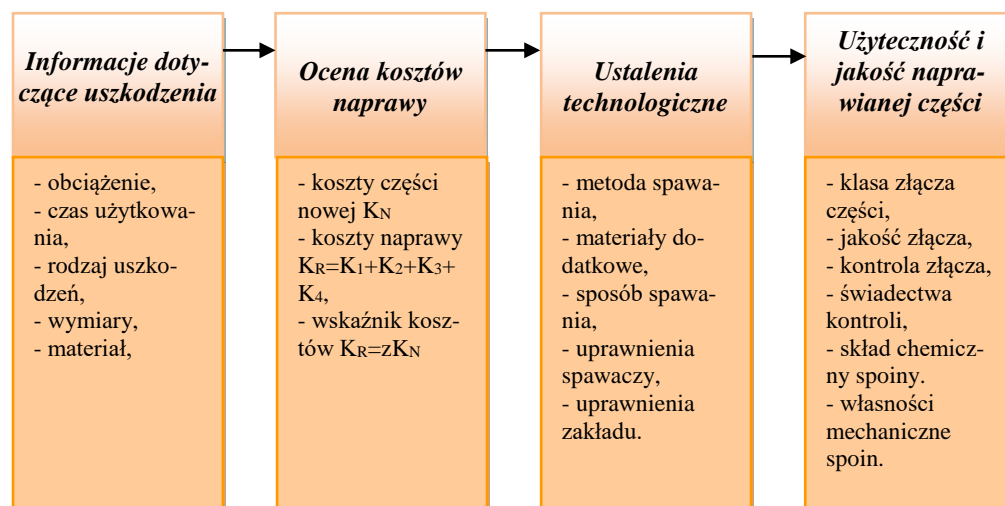
K_3 – koszty obróbki mechanicznej,

K_4 – koszty ogólne.

Naprawa uszkodzonej części jest celowa, gdy spełniona jest nierówność 1:

$$K_R * z \leq K_N \quad (3)$$

Kolejne czynności 3 i 4 w algorytmie na rys. 19 decydują o wyborze technologii spawania i o procesie wykonania naprawy. Informacje wymagane do wykonania naprawy metodami spawania zestawiono na rys. 20.



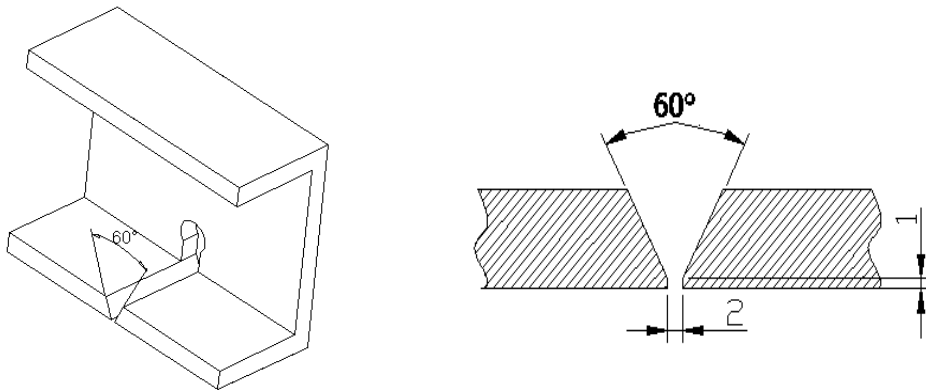
Rys. 20. Wymagane informacje przy naprawie uszkodzonej części za pomocą spawania [71]

Przeprowadzenie powyżej przedstawionych analiz poprzedzających naprawę pozwala na stwierdzenie czy istnieje ekonomicznie uzasadniona możliwość naprawy ramy, czy bardziej „opłacalnym” z punktu widzenia ekonomii zabiegiem jest jej wymiana na część nową.

7.3. Dodatkowe wymagania odnośnie sposobu przeprowadzania spawania ram pojazdów ciężarowych

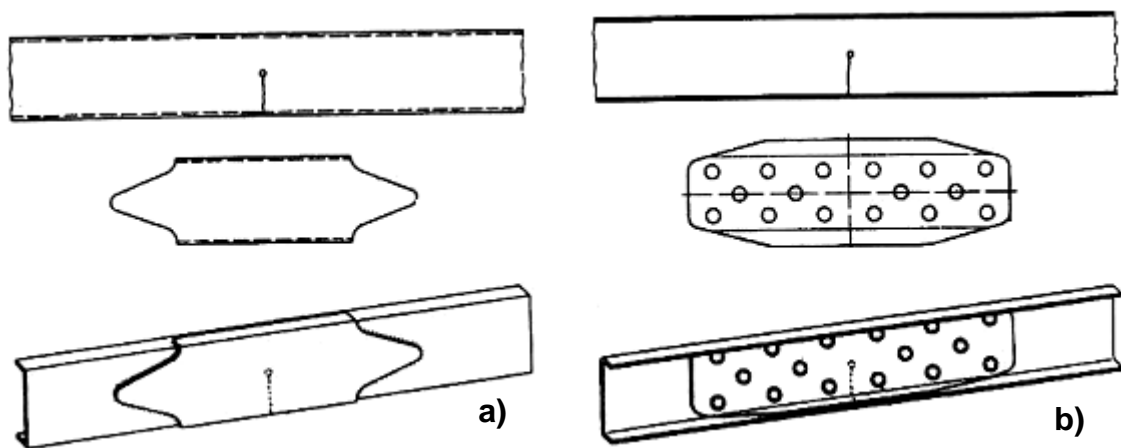
Niewłaściwa eksploatacja samochodów ciężarowych może powodować uszkodzenie ramy i konieczność jej naprawy i wzmocnienia. Podawane przez producentów pojazdów ciężarowych wytyczne nie sprowadzają się tylko i wyłącznie do określenia metody spawania

oraz zalecanego materiału dodatkowego [41, 41, 62÷64] Wytyczne odnośnie spawania obejmują również sposób właściwego przygotowania łączonych elementów. Przedstawiono to na rysunku 21.



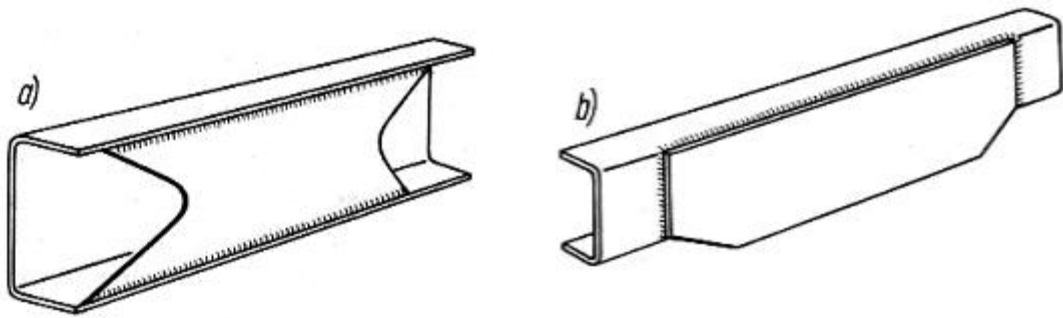
Rys. 21. Sposób przygotowania krawędzi łączonych elementów ram za pomocą spawania elementów [63]

W przypadku napraw pękniętych podłużnic zalecane jest również zastosowanie odpowiednich wkładek wzmacniających [22, 63].



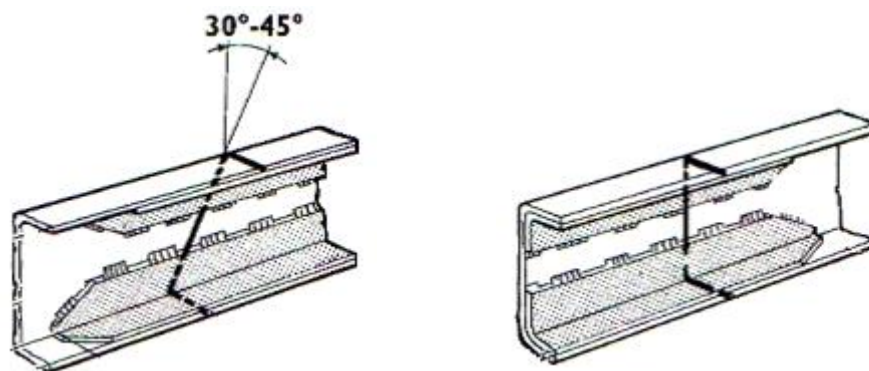
Rys. 22. Przykład naprawy pęknięcia ramy a) za pomocą spoin otworowych elektrodami otulonymi; b) wzmocnienia spawanego MAG [71]

W miejscach występowania dużych pęknięć lub znacznie odkształconych stosuje się nakładki wzmacniające (rys. 23), które zabezpieczają naprawione miejsce przed ponownym uszkodzeniem.



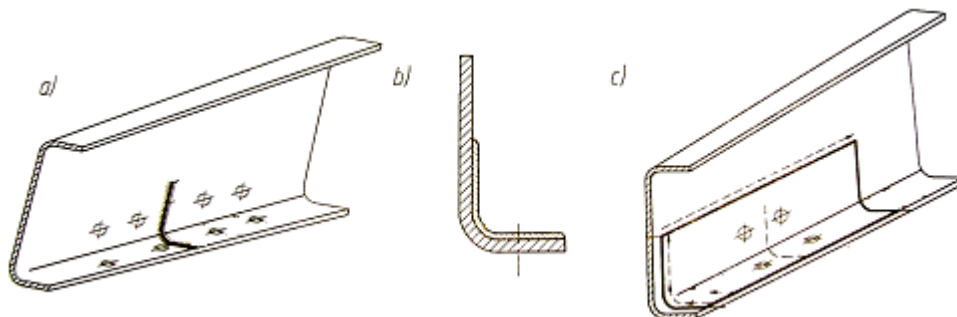
Rys. 23. Wzmocnienie naprawianego miejsca przez spawanie: a) wkładki, b) nakładki [71]

Równie dużym obostrzeniom poddawane są zabiegi związane z modyfikacją ramy, tzn.: wymogi dotyczące spawania, sposobu przecięcia podłużnicy oraz umieszczenia dodatkowych wkładek wzmacniających [42, 62, 63].



Rys. 24. Sposób wykonania oraz wzmocnienia łączenia podłużnic po procesie modyfikacji [63]

W przypadku naprawy podłużnicy, gdy pęknięcie znajduje się w pobliżu znajdujących się w ramie otworów, koniecznym jest zastosowanie wkładki wzmacniającej obejmującej swoją powierzchnią również obszar występowania otworów [69, 70, 72].



Rys. 25. Naprawa pęknięcia podłużnicy
a) spawanie pęknięcia, b) nakładka wzmacniająca, c) wspawanie wstawki [72]

Zachowanie wszystkich wytycznych odnośnie sposobu przygotowania łączonych krawędzi, zastosowania odpowiedniej metody spawania oraz odpowiedniego materiału dodatkowego ma być gwarantem powstania złącza o odpowiednio wysokich właściwościach plastycznych oraz wytrzymałościowych [72].

8. Procesy spawania w naprawie oraz przebudowie ram pojazdów ciężarowych

Pojęcie spawalności jest wybitnie złożonym i zdefiniowanie go pod względem technologiczno-metalurgicznym w krótkim i prostym ujęciu jest niezwykle trudne. Na spawalność składa się wiele zjawisk trudnych do uchwycenia nawet w toku prowadzonych badań naukowych.

Definicja spawalności w miarę prowadzonych badań, poznawania nowych zjawisk oraz zależności zmieniała się w ciągu lat w istotny sposób. Jedną z pierwszych definicji spawalności pojawiła się w roku 1924, zakładała, iż „Materiał uważa się za spawalny, jeżeli różne części ze stali o podobnym składzie chemicznym dają się połączyć w jedną całość przy użyciu ciepła” [73]. Obecne podejście do tematu spawalności rozpatrywane jest na ogół z trzech różnych punktów widzenia [74]:

- **spawalność technologiczna** – jest związana z odpowiednią metodą spawania, z doбором odpowiednich parametrów (*rodzaj prądu, napięcie, natężenie*), z doбором odpowiednich materiałów dodatkowych (*elektrod, drutów*), temperatury otoczenia i temperatury spawanego elementu przed i w czasie spawania;
- **spawalność metalurgiczna** – jest związana ze składem chemicznym spawanego metalu, strukturą, zawartością rozpuszczonych gazów i wtrąceń niemetalicznych;
- **spawalność konstrukcyjna** – jest uwarunkowana rozmiarami konstrukcji, sztywnością, przekrojami łączonych elementów, przekrojami spoin, rozmieszczeniem spoin oraz warunkami eksploatacyjnymi konstrukcji.

8.1. Spawalnicze metody stosowane w naprawach oraz przebudowach pojazdów ciężarowych

Naprawy w zakres, których wchodzi proces spawania powinny być przeprowadzane zgodnie z podawanymi przez producentów pojazdów zaleceniami. Zalecenia te niemalże w każdym przypadku obejmują metodę spawania oraz rodzaj materiału dodatkowego. Analiza instrukcji napraw wykazała, iż zalecenia producentów samochodów odnośnie stosowanych

metod spawania nie zawsze są ze sobą spójne. Część producentów wskazuje jako odpowiednią metodę spawania ram metodę GMA (*MIG/MAG*). Ci sami producenci zalecają też spawanie metodą MMA (*spawanie elektrodami otulonymi*) z zastosowaniem elektrody o otulinie zasadowej [42, 62÷64]. Istnieje również pewna grupa producentów zalecających spawanie metodą MMA (*spawanie elektrodami otulonymi*) z zastosowaniem elektrod o otulinie rutyłowej [65÷67]. Starsze (*wydawane w latach 70-tych*) instrukcje napraw nie zawierały żadnych wytycznych odnośnie metod spawalniczych stosowanych do naprawy oraz przebudowy pojazdów ciężarowych [69, 70].

Zalecanymi przez producentów metodami spawania ram pojazdów ciężarowych są:

- spawanie łukowe w osłonie gazowej elektrodą topliwą (*GMA, MIG/MAG*),
- spawanie ręczne elektrodą otuloną (*MMA*) z zastosowaniem elektrod:
 - o otulinie zasadowej,
 - o otulinie rutyłowej.

8.1.1. Spawanie łukowe w osłonie gazowej elektrodą topliwą (GMA, MIG/MAG)

Spawanie metodą GMA (*Gas Metal Arc*) jest metodą bardzo popularną oraz powszechną. Skrót GMA określający tę metodę obowiązuje głównie w USA jednak jest również coraz powszechniejszy w Europie. Skrót ten obejmuje wszystkie rodzaje gazów ochronnych. Skrót MIG (*Metal Inert Gas*) obowiązuje w Europie i dotyczy tylko osłon gazowych obojętnych (*He, Ar*). Natomiast skrót MAG tyczy się tylko aktywnych gazów ochronnych (*CO₂ oraz mieszanki gazów obojętnych z CO₂*) [73].

Elektrodą w omawianej metodzie jest nawinięty na szpulę drut pełny lub proszkowy. Drut elektrodowy jest mechanicznie odwijany ze szpuli i podawany do uchwytu elektrodowego, w którym jest zasilany energią elektryczną. Jarzący się łuk elektryczny stapia wysuwającą się elektrodę oraz nadtapia brzegi spawanego przedmiotu. Jeziorko spawalnicze jest osłonięte strumieniem gazu ochronnego do chwili jego zakrzepnięcia.

Przy spawaniu w osłonie gazów w przestrzeni łuku nie występują substancje łatwo jonizujące się, zatem łuk jarzy się stosunkowo niespokojnie, natomiast nierównomierny przepływ kropli metalu powoduje znaczne rozpryski [73].

8.1.2. Spawanie ręczne elektrodą otuloną (MMA)

Spawanie elektrodami otulonymi to najstarsza i najbardziej uniwersalna metoda spawania [74÷77]. Skrót MMA (*Manual Metal Arc*) jest stosowany w USA oraz Europie.

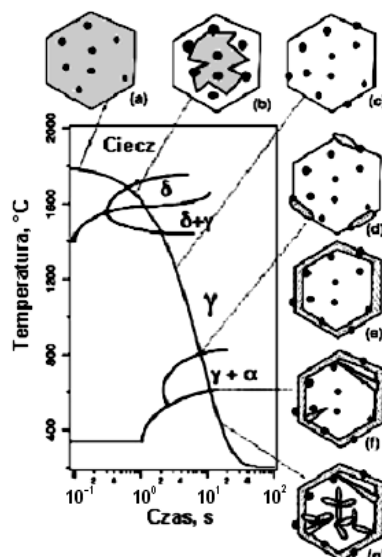
Zasada spawania tą metodą jest następująca: ciepło powstające w łuku elektrycznym jarzącym się pomiędzy końcówką otulonej elektrody a spawanym przedmiotem powoduje stopienie zarówno elektrody jak i krawędzi spawanego elementu. Jednocześnie wraz ze stopieniem rdzenia otulonej elektrody topi się również jej otulina, odgrywając bardzo istotną rolę w procesach fizycznych jak i metalurgicznych występujących podczas spawania. Z otuliny, po jej przetopieniu powstaje żużel, który szczelnie pokrywa metal spoiny, chroniąc go w ten sposób przed dostępem atmosfery. Wydzielające się podczas topienia otuliny gazy stanowią osłonę dla kropli roztopionego metalu przelatujących w łuku elektrycznym. Otulina dostarcza również składników stopowych oraz odtleniaczy. W skład otuliny wchodzi również składniki ułatwiające jonizację przestrzeni gazowej, co stabilizuje jarzenie się łuku elektrycznego.

8.2. Struktura metalograficzna stopiwa

Złącze spawane składa się z kilku charakterystycznych stref. Strefami tymi są spoina, i strefa wpływu ciepła. Sposób formowania się struktury metalograficznej stopiwa elektrodowego w literaturze podawany jest w następujący sposób: podczas ciągłego chłodzenia austenitu najpierw tworzy się na granicach ziaren gruboziarnisty, przedutektoidalny ferryt, następnie ferryt płytkowy, skierowany prawie prostopadle do wnętrza ziaren byłego austenitu, natomiast na końcu tworzy się wewnątrz ziaren drobnoziarnisty ferryt. Pewne, stosunkowo niewielkie ilości austenitu mogą przemienić się w niższych temperaturach w bainit oraz martenzyt. Bardzo niewielkie ilości austenitu mogą pozostać w strukturze metalograficznej jako tzw. austenit szczytkowy [77, 76 ÷78]. Struktura metalograficzna niskowęglowego oraz niskostopowego stopiwa elektrodowego składa się, zatem, głównie z trzech odmian morfologicznych ferrytu [78]:

- gruboziarnistego ferrytu podutektoidalnego oznaczonego wg. Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa oznaczonego jako GBF (*grain boundary ferrite*);
- płytkowego ferrytu oznaczonego wg. Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa oznaczonego jako PF (*primary ferrite*);
- drobnoziarnistego, wewnątrz ziarnowego ferrytu oznaczonego wg. Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa oznaczonego jako AF (*acicular ferrite*).

Krzywą chłodzenia stopiwa elektrodowego od temperatury powyżej likwidusu do temperatury otoczenia wraz z zaznaczonymi punktami przemian fazowych przedstawiono na rysunku 26 .



Rys. 26. Krzywa chłodzenia stopiwa elektrodowego

a- ciecz, b- krystalizacja ziaren austenitu z zaznaczonymi wtrąceniami niemetalicznymi, c- ziarna austenitu z zaznaczonymi wtrąceniami niemetalicznymi, d, e- ferryt GBF, f- ferryt GBF oraz ferryt SPF, g- ferryt GBF, SPF oraz AF [79]

Literatura tematyczna podaje, że zdecydowanie najkorzystniejszą pod względem udarności fazą jest ferryt drobnoziarnisty (*ferryt AF*) [78÷82]. Pozytywny wpływ dużych udziałów drobnoziarnistego ferrytu AF na udarność stopiwa elektrodowego przedstawiony jest w literaturze w sposób jednoznaczny [78÷82]. Jednak opinie dotyczące warunków sprzyjających formowaniu się tej korzystnej odmiany morfologicznej ferrytu (*ferrytu AF*) już takie ujednolicone nie są. Podawane w literaturze teorie nie są ze sobą spójne, co więcej niektóre z nich się wzajemnie wykluczały. Spośród pojawiających się w doniesieniach literaturowych hipotez dotyczących zarodkowania drobnoziarnistego ferrytu AF najwyraźniej wyróżniały się:

- odpowiednia szybkość chłodzenia [84÷86],
- obecność w stopiwie wtrąceń niemetalicznych o odpowiednim składzie chemicznym, [87÷71],
- dopasowanie sieciowe między ferrytem AF a wtrąceniami [87],
- nie istotny jest skład wtrąceń, natomiast ważna jest ich wielkość oraz gęstość rozmieszczenia [92÷96],
- energia powierzchniowa wtrąceń, może obniżać barierę energetyczną zarodkowania ferrytu AF [85],

- układ naprężeń oraz dyslokacji wokół wtrąceń powodujący obniżenie bariery energetycznej zarodkowania ferrytu AF [97],
- całkowity brak związku pomiędzy faktem występowania wtrąceń niemetalicznych a zarodkowaniem ferrytu AF [98].

Należy zauważyć iż stosunkowo często pojawiającym się w przedstawionych teoriach wątkiem był wątek tlenkowych wtrąceń niemetalicznych. Obecność wtrąceń tlenkowych uzależniona była od zawartości tlenu w stopiwie [99÷105].

8.3. Podział metod spawalniczych

Podziału metod spawalniczych można dokonywać pod bardzo wieloma względami. Najpopularniejszym i zarazem najbardziej ogólnym podziałem metod spawania jest podział bazujący na rozróżnieniu źródeł ciepła. Kryterium to dzieli metody spawalnicze na spawanie gazowe, elektryczne, elektronowe, laserowe, plazmowe itd. [76].

Innym kryterium jest podział spawania pod względem użytego materiału dodatkowego jak również mechanizmu przeprowadzania procesu. Kryterium te pozwala rozróżnić spawanie elektrodami otulonymi, spawanie elektrodą topliwą lub nietopliwą w osłonie gazów itd. [106].

Innymi podziałami dzielącymi metody spawania są kryteria dzielące je pod względem zawartości pewnych pierwiastków w stopiwie elektrodowym. Najstarszym przykładem takiego kryterium jest podział metod spawania pod względem zawartości wodoru w stopiwie. Kryterium te wyłącza metody nisko oraz wysokowodorowe [77].

Znacznie nowszymi podziałami metod spawalniczych są kryteria pozwalające podzielić metody spawania pod względem zawartości tlenu oraz azotu w stopiwie [78, 107÷109].

Istotne kryteria dla metod spawalniczych stosowanych w naprawach oraz zabudowach ram pojazdów ciężarowych zostaną omówione w następnych punktach pracy.

8.3.1. Podział pod względem zawartości wodoru

Wodór w złączach spawanych jest pierwiastkiem niekorzystnym. Obecność wodoru może powodować występowanie szeregu wad spawalniczych takich jak [110÷113]:

- kruchość wodorowa,
- korozja naprężeniowa i ługowa,
- pęcherze określane mianem „rybich oczu”,
- pęknięcia w strefie wpływu ciepła.

W metalurgii spawania wodór występujący w złączach spawanych dzieli się na [74]:

- wodór potencjalny - określany z przeliczenia zawartości wilgoci i wody w otulinach elektrod lub w innego rodzaju materiałach dodatkowych, wydzielonej w procesie suszenia w temperaturze 100°C,
- wodór dyfundujący - określany jest na podstawie wydzielania z gotowych złączy spawanych w temperaturze otoczenia.
- wodór stały - pozostały w złączu spawanym po wydzieleniu się wodoru dyfundującego.

Klasyfikacja procesów spawania pod względem zawartości wodoru bazuje na ilości tzw. wodoru całkowitego, czyli sumie wodoru dyfundującego oraz stałego mierzonego w stopiwie stalowym wykonanym daną metodą spawalniczą. Podział metod spawalniczych ze względu na zawartość wodoru całkowitego prezentuje się w następujący sposób [77]:

- Procesy niskowodorowe - do 5 ml/ 100g stopiwa,
- Procesy wysokowodorowe - powyżej 5 ml/100g stopiwa.

Do chwili obecnej całościowo sklasyfikowane pod względem zawartości wodoru zostały tylko procesy spawania elektrodą otuloną. W metodzie spawania otulonymi elektrodami mianem procesu niskowodorowego określa się spawanie elektrodami zasadowymi przy zachowaniu staranności suszenia tych elektrod przed procesem spawania. Inne metody jak np. MIG, MAG, TIG mogą być procesami niskowodorowymi lub wysokowodorowymi w zależności od zastosowanego materiału dodatkowego, gazu osłonowego jak i utrzymania odpowiedniego reżimu technologicznego.

8.3.2. Podział pod względem zawartości tlenu

Poglądy na rolę tlenu w stopiwach w ostatnich 30 latach znacznie się zmieniały i nie są one ujednoczone do chwili obecnej. Początkowo sądzono, iż wraz ze zmniejszającą się zawartością tlenu w stopiwie elektrodowym własności plastyczne tego stopiwa wzrastają. Obecnie uważa się, że istnieje pewna, optymalna ilość tlenu, przy której własności plastyczne stopiwa są najkorzystniejsze, jednak nie jest to hipoteza jednogłośnie podawana w literaturze. Tlen odgrywa istotną rolę w przemianie żelaza γ w ferryt drobnoziarnisty [114,115]:



Pomimo niepoznanej jeszcze do końca roli tlenu w kształtowaniu własności stopiw elektrodowych powstało kryterium dzielące metody spawalnicze na procesy nisko, średnio oraz wysokotlenowe. Kryterium te powstało w oparciu o przeprowadzone badania stopiw wykonanych z użyciem materiałów dodatkowych wytworzonych w warunkach laboratoryjnych [78].

Zawartość tlenu w stopiwie wykonanym elektrodami otulonymi zależy od charakteru otuliny oraz zachowania reżimu technologicznego (*np. wymóg suszenia elektrod zasadowych*). Powszechnie uznanym oraz potwierdzonym badaniami poglądem jest twierdzenie, że optymalna zawartość tlenu w stopiwie elektrod niskowęglowych, przeznaczonych do spawania stali niskostopowych wynosi 250÷450 ppm. Górna wartość przedziału optymalnej zawartości tlenu jest wartością dzielącą procesy nisko oraz średniotlenowe [78]. Istotnym czynnikiem warunkującym zawartość tlenu w stopiwie w przypadku spawania elektrodami otulonymi jest charakter otuliny. Podział materiałów dodatkowych do spawania elektrodami otulonymi ze względu na zawartość tlenu w stopiwie:

- **elektrody niskotlenowe** - elektrody w stopiwie których zawartość tlenu nie przekracza wartości 450 ppm, do elektrod gwarantujących powstanie stopiwa o takiej zawartości tlenu należało zaliczyć elektrody o otulinie zasadowej,
- **elektrody średniotlenowe** - elektrody w stopiwie, których tlen występuje w ilości 450÷650 ppm., elektrodami za pomocą, których możliwym jest wykonanie stopiwa o takiej zawartości tlenu są elektrody rutyłowe,
- **elektrody wysokotlenowe** - elektrody kwaśne oraz utleniające. Stopiwa wykonane za pomocą tych elektrod zawierają powyżej 650 ppm tlenu.

Zawartość tlenu w stopiwie wykonanym metodą MIG/MAG zależy od rodzaju zastosowanego gazu osłonowego oraz od gatunku użytego drutu elektrodowego. Podział stopiw oraz procesów w ramach metody MIG/MAG prezentuje się w następujący sposób [109]:

- niskotlenowy proces spawania metodami MIG/MAG - proces w wyniku, którego powstaje stopiwo o zawartości poniżej 350 ppm tlenu,
- średniotlenowy proces spawania metodami MIG/MAG - proces w wyniku, którego powstaje stopiwo o zawartości poniżej 350÷500 ppm tlenu,
- wysokotlenowy proces spawania metodami MIG/MAG - proces w wyniku, którego powstaje stopiwo o zawartości powyżej 500 ppm tlenu.

8.4. Wpływ zawartości tlenu na udarność stopiwa

Opisane w poprzednim podrozdziale kryterium, poza podziałem metod spawalniczych na procesy niskotlenowe, średniotlenowe oraz wysokotlenowe pozwala określić udarność stopiwa w zależności, między innymi od zawartości w nim tlenu. Wzór (3) wiążący udarność stopiwa z zawartością tlenu jest słuszny dla stopiw wykonanych otulonymi elektrodami. Uwzględnia on również zawartość azotu w stopiwie, jak również udziały procentowe drobnoziarnistego ferrytu AF [78].

$$U_v = (300 - 0,22 O_s - 0,6 N_s + F_\alpha) P \quad (5)$$

gdzie:

U_v – udarność Charpy'ego, J;

O_s – stężenie tlenu w stopiwie, ppm;

N_s – stężenie azotu w stopiwie, ppm;

F_α – procentowa zawartość ferrytu drobnoziarnistego (AF);

P- współczynnik temperaturowy: P= 1 dla temp +20°C

P= 0,8 dla temp 0°C

P= 0,6 dla temp -20°C

P= 0,4 dla temp -40°C

P= 0,2 dla temp -60°C

Zgodnie z obliczeniami przeprowadzonymi przez autora kryterium wartość udarności wyznaczona z wzoru 4 charakteryzowała się błędem maksymalnym dla analizowanych danych: 13 J oraz błędem średniokwadratowym 5,57 J.

8.5. Wytrzymałość złączy spawanych

Połączenie spawane składa się z następujących stref: spoina, strefa wpływu ciepła, materiał rodzimy itd. Każda z wymienionych stref posiada odmienną budowę strukturalną i w związku z tym charakteryzuje się innymi właściwościami mechanicznymi. O wytrzymałości złącza spawanego decyduje strefa o najniższych właściwościach [116]. W przypadku próby statycznego rozciągania na próbkach o jednakowej szerokości na całej długości pomiarowej obejmującej spoinę, istnieją odcinki o różnej plastyczności i różnym współczynniku wydłużenia. Największe wydłużenia zarejestrowano w materiale rodzimym, najmniejsze w strefie wpływu ciepła oraz w samej spoinie. Strefy o mniejszym

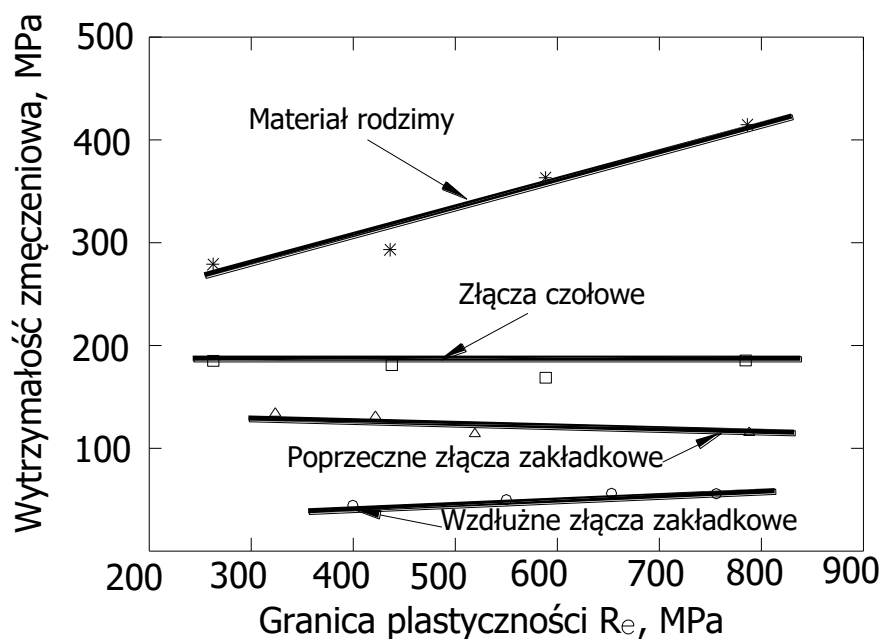
odkształceniom mają zazwyczaj większą twardość. Przewężenie i szyjka powstają w materiale rodzimym i tam następuje zerwanie próbki [116]. Najslabszym ogniwem doczołowego złącza spawanego poddanego rozciąganiu jest materiał rodzimy oraz strefa wpływu ciepła.

Spawane połączenia zakładkowe są wykonane spoinami pachwinowymi podłużnymi lub poprzecznymi. Do obliczeń naprężeń ścinających siłą F , jako teoretyczny przekrój spoiny przyjmuje się iloczyn sumy grubości wszystkich spoin i ich łącznej długości. Uproszczenie takie stosuje się ze względu na bardzo złożony stan naprężeń w spoinach pachwinowych. Przeprowadzone badania [116] wykazały, że w takim przypadku złącze spawane zostaje niejako ścięte w strefie spoiny. We wstępnych obliczeniach przyjmuje się, że wytrzymałość poprawnie wykonanego złącza spawanego zakładkowego wynosi około 0,8 wytrzymałości materiału rodzimego.

W celu określenia własności plastycznych złącza spawanego stosuje się próbę udarności. Próbkę do badania udarności wykonuje się tak, aby nacięty karb znajdował się w różnych strefach złącza spawanego. Z otrzymanych wyników przyjmuje się wartość najmniejszą, która jednocześnie wskazuje na strefę o najmniejszej plastyczności. Plastyczność stref jest uzależniona od:

- zastosowanej metody spawania oraz użytego materiału dodatkowego,
- uwzględnienia zjawiska starzenia stali,
- temperatury przeprowadzenia próby.

Inną grupę obciążeń pojawiających się podczas eksploatacji połączeń spawanych w ramach pojazdów ciężarowych stanowią obciążenia zmienne. Generalnie przyjąć należy, iż połączenia spawane wykazują się mniejszą wytrzymałością zmęczeniową niż materiał rodzimy. Wyniki prowadzonych badań [117], ukazujących wytrzymałość zmęczeniową poszczególnych stref złączy spawanych przedstawiono na rys. 27.



Rys. 27. Relacje pomiędzy granicą plastyczności R_e a wytrzymałością zmęczeniową złączy spawanych [117]

Różne wartości wytrzymałości zmęczeniowej poszczególnych stref złącza spawanego są wynikiem występowaniem znacznych niejednorodności strukturalnych w obrębie złącza spawanego. Pojęcie niejednorodności można również rozszerzyć na niejednorodność kształtu zewnętrznego złącza spawanego w stanie nieobrobionym. Przeprowadzone badania [116] wykazały, iż uszkodzenie złącza spawanego na skutek występowania obciążeń zmiennych następuje w materiale rodzimym lub też w strefie wpływu ciepła, przy czym zapoczątkowanie pęknięcia ma miejsce zwykle na końcu lub na brzegu spoiny. Taki sposób uszkodzeń złączy spawanych nie jest regułą. Udokumentowano, przypadki uszkodzeń połączeń spawanych na skutek działania obciążeń zmiennych, przy czym pęknięcia połączeń zlokalizowane były w strefie spoiny [118, 119].

8.6. Podsumowanie przeglądu literatury

Zwiększająca się liczba pojazdów ciężarowych na polskich drogach powoduje duże, oraz będzie generowała jeszcze większe potrzeby przeprowadzania napraw i obsługi, wymagających użycia procesów spawalniczych. Nierzadko spawanie obejmuje najważniejsze i najbardziej odpowiedzialne elementy pojazdu, czyli elementy ramy nośnej. Poza zastosowaniem spawania do napraw oraz przebudów ram pojazdów ciężarowych, spawanie jest stosowane również do wytwarzania tzw. ram dodatkowych np.:

- ramy podźurawiove,
- ramy wywrotu,
- ramy podkontenerowe, itd.

Ostatecznej, indywidualnej kontroli przeprowadzanej przez Urząd Dozoru Technicznego są poddawane tylko tzw. ramy podźurawiove i urządzenia typu HDS na nich montowane.

Naprawy, przebudowy i procesy budowy struktur różnego rodzaju ram z użyciem spawania należą do grupy czynności, na których spoczywa ogromna odpowiedzialność. Z literatury wynika, że od poprawności przeprowadzenia czynności spawalniczych zależy w dużej mierze bezpieczeństwo użytkowania naprawianych pojazdów. Pogląd taki wynika z badań związanych z ogólnie pojętym bezpieczeństwem użytkowania pojazdów ciężarowych. Złącza spawane są bardzo istotnymi elementami struktury nośnej pojazdów. Wykazały to próby przeprowadzone zgodnie z wytycznymi ECE R 66. Przeprowadzone próby symulujące najniebezpieczniejsze zdarzenia, polegające na bocznym wywróceniu autobusu wykazały, iż złącza spawane, łączące elementy struktury nośnej tego typu pojazdów, są najsilniej obciążonymi elementami konstrukcji. Stwierdzono, iż od ich właściwości zależy odkształcalność całej konstrukcji a tym samym utrzymanie przestrzeni przeżycia we wnętrzu autokaru. Również badania pojazdów ciężarowych eksploatowanych w kopalniach wskazały, że właściwości złączy spawanych, łączących elementy takich pojazdów przekładają się na bezpieczeństwo [18, 19]. Prowadzone badania obudów kabin pojazdów ciężarowych służących do transportu ludzi w kopalniach wykazały, iż największe zarejestrowane w testach naprężenia występowały w miejscach, w których są zlokalizowane połączenia spawane. Podobny wniosek o wpływie właściwości złącza spawanego na bezpieczeństwo wyniknął również z analizy stanu naprężeń w ramach nośnych pojazdów ciężarowych. Analiza uwidoczniała, iż miejsca, w których występowały złącza spawane stały się tak zwanymi „koncentratorami naprężeń” [53].

Pomimo ogromnej odpowiedzialności spoczywającej na złączach spawanych występujących w konstrukcjach pojazdów ciężarowych, producenci tych pojazdów umożliwiają wykonywanie zabiegów spawalniczych również w obrębie ram nośnych. Producenci podają w wydawanych instrukcjach napraw dokładne wytyczne odnośnie przeprowadzania procesu spawania. Wytyczne te obejmują między innymi:

- wymagane kwalifikacje spawacza,
- odpowiednią metodę spawania,
- użycie odpowiednich materiałów dodatkowych oraz ich ewentualne przygotowanie,

- przygotowanie krawędzi elementów do spawania.

Zalecenia producentów dotyczące procesu spawania mają zapewnić wytworzenie złącza o wysokiej jakości, o właściwościach dostosowanych do warunków pracy pojazdu ciężarowego. Zalecana metoda spawania oraz proponowane materiały dodatkowe podawane w instrukcjach napraw muszą zapewniać powstanie złącza o odpowiednich parametrach z uwzględnieniem rodzaju materiału, z którego są wykonane ramy pojazdów ciężarowych. Ramy produkowanych obecnie pojazdów są wykonywane ze stali niskostopowej o podwyższonej wytrzymałości. Informacje zawarte w literaturze specjalistycznej [41, 42, 64, 123] wskazują na to, że do produkcji ram pojazdów ciężarowych jest używana stal w gatunku S355J2G3 (I8G2 wg PN). Skoro producenci pojazdów ciężarowych wykonują ramy pojazdów z bardzo zbliżonych do siebie materiałów, jak również warunki pracy danych typów pojazdów ciężarowych są do siebie zbliżone należało spodziewać się zbieżności w zalecanych metodach spawania. Generalnie są zalecane metody spawania:

- łukowe w osłonie gazowej elektrodą topliwą (*GMA, MIG/MAG*),
- ręczne elektrodą otuloną (*MMA*) z zastosowaniem elektrod:
 - o otulinie zasadowej,
 - o otulinie rutyłowej.

Z przeglądu literatury wynika, że istnieją kryteria pozwalające na pewien podział metod spawalniczych. Powszechnie znanym i stosowanym jest podział wynikający z kryterium bazującego na zawartości wodoru w stopiwie. Dzieli on metody spawania na procesy nisko oraz wysokowodorowe. Mała zawartość wodoru jest jednym z gwarantów wytworzenia złącza spawanego pozbawionego różnego rodzaju wad, wynikających z obecności tego pierwiastka w stopiwie. Wadami wynikającymi z obecności wodoru mogą być: kruchość wodorowa, korozja naprężeniowa i ługowa, pęcherze określane mianem „rybich oczu”, pęknięcia w strefie wpływu ciepła [110÷113]. Całkowity podział procesów spawania pod względem zawartości wodoru został przeprowadzony tylko i wyłącznie w metodzie spawania elektrodami otulonymi. Z przeprowadzonych oraz opisanych badań [77] wynika, iż spośród wszystkich elektrod otulonych stosowanych do spawania na miano tzw. elektrod niskowodorowych zasługują tylko elektrody o otulinie zasadowej. Użycie takich elektrod zalecają wiodący producenci pojazdów ciężarowych [41, 42, 62, 64]. Wyjątkiem są krajowi producenci pojazdów [65÷70], którzy dopuszczają użycie elektrod o otulinie rutyłowej. Elektrody rutyłowe są elektrodami wysokowodorowymi. Można przypuszczać, iż przyzwolenie na stosowanie elektrod wyso-

kowdorowych wynika po części z łatwości ich używania. Głównym powodem zalecania rutylo-
wych elektrod otulonych do spawania elementów ram nośnych pojazdów ciężarowych jest
powielanie informacji zawartych w instrukcjach napraw wydawanych w latach 70-tych.
Wskazuje to na brak wyników badań oraz brak prowadzonych badań złączy spawanych znaj-
dujących się w ramach pojazdów ciężarowych.

Sklasyfikowanie pozostałych, zalecanych przez producentów pojazdów ciężarowych
metod spawania, czyli metody MIG oraz MAG w świetle omawianego kryterium wodorowe-
go takim łatwym nie jest. Koniecznym jest uwzględnienie zalecanych materiałów dodatko-
wych, czyli gatunku drutu elektrodowego oraz rodzaju gazu ochronnego do spawania. Zale-
canym materiałami dodatkowymi są drut w gatunku SG3, np. ESAB Autrod 12.64 oraz gaz
osłonowy AGA MIX AK 20 ($80Ar+20CO_2$). Z katalogów materiałów dodatkowych opubli-
kowanych przez ich producentów spawanie z użyciem takich gatunków drutu oraz gazu osło-
nowego zaliczyć należało do grupy niskowodorowych procesów spawania [120, 121].

Podsumowując należy stwierdzić, iż obecnie zalecanymi przez czołowych producentów
pojazdów ciężarowych metodami spawania są metody niskowodorowe. Wyjątek stanowią
polscy producenci pojazdów ciężarowych, którzy nakazują spawanie ram pojazdów ciężaro-
wych otulonymi elektrodami rutyłowymi, czyli elektrodami wysokowodorowymi.

Kolejnym i znacznie młodszym od kryterium wodorowego jest kryterium podziału
metod spawalniczych pod względem zawartości tlenu w stopiwie. Rola tlenu w kształtowaniu
własności plastycznych i wytrzymałościowych stopiwa jest podawana w literaturze w sposób
niejednoznaczny. Istnieje wiele hipotez (*niejednokrotnie wzajemnie się wykluczających*) od-
nośnie roli tlenu. Kryterium tlenowe powstało na bazie hipotezy zakładającej zarodkowanie
korzystnej pod względem własności plastycznych - fazy ferrytu drobnoziarnistego (*ferrytu AF*
wg Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa) na wtrąceniach o odpowiedniej wymiarach
i składzie chemicznym. Zgodnie z tą hipotezą wymiary wtrąceń niemetalicznych zależą od
ilości tlenu w stopiwie. Za najbardziej korzystne wtrącenia zgodnie z omawianą hipotezą
uważa się wtrącenia o średniej średnicy około $0,5 \mu m$ [80]. Mniejsze lub większe wtrącenia są
mniej korzystne pod względem zarodkowania ferrytu drobnoziarnistego (*ferrytu AF*). Po-
wstawaniu wtrąceń o optymalnych wymiarach sprzyja zawartość tlenu w stopiwie na pozio-
mie około 450 ppm. Tlen jest pierwiastkiem w zależności od jego ilości w stopiwie wpływa-
jącym korzystnie na właściwości plastyczne stopiwa lub też oddziałującym negatywnie
[100÷104].

Podział metod spawalniczych zalecanych przez producentów pojazdów ciężarowych w świetle tzw. kryterium tlenowego wygląda następująco:

- zalecana metoda spawania elektrodami otulonymi:
 - spawanie otulonymi elektrodami rutyłowymi - **proces średniotlenowy**,
 - spawanie otulonymi elektrodami zasadowymi - **proces niskotlenowy**.
- zalecana metoda spawania elektrodą topliwą w osłonie gazów (*MIG/MAG*):
 - spawanie metodą MAG – spawanie topliwą elektrodą gatunku SG3 w osłonie gazu 80% Ar+20CO₂ - **proces średniotlenowy**,
 - spawanie metodą MIG – Spawanie topliwą elektrodą gatunku SG3 w osłonie gazu 99,97% Ar - **proces niskotlenowy**.

Podsumowując metody spawania zalecane przez producentów do naprawy i przebudowy ram nośnych pojazdów ciężarowych są to w zdecydowanej większości procesy niskowodorowe (*wyjątek stanowią zalecenia Polskich producentów pojazdów ciężarowych, którzy zalecają spawanie otuloną elektrodą rutyłową*).

Kryterium tlenowe dzieliło zalecane przez producentów metody na metody średnio oraz niskotlenowe.

8.7. Teza

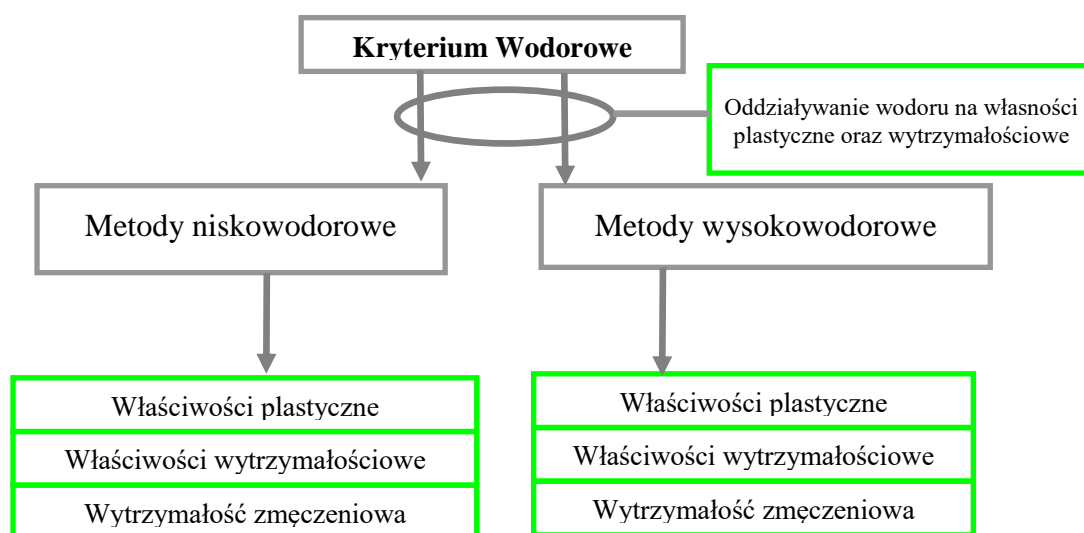
Informacje wynikające z przeglądu literatury dotyczące zaleceń odnośnie spawalniczych metod do napraw oraz modyfikacji ram pojazdów ciężarowych wskazują na to że dobór zalecanych metod uwzględnia znane i powszechne kryterium wodorowe. Kryterium to pozwala na wyeliminowanie metod spawalniczych, których stopiwo charakteryzuje się niskimi właściwościami. Praktycznie wszyscy producenci pojazdów ciężarowych z wyjątkiem polskich zalecają zastosowanie metod niskowodorowych. Zastosowanie takich właśnie metod jest jednym z gwarantów otrzymania złącza pozbawionego szeregu wad. Nie zauważono jednak w zalecanych metodach spawania konsekwencji odkrycia nowego, stosunkowo młodego kryterium bazującego na zawartości tlenu w stopiwie. Literatura naukowa podaje informacje, że kryterium takie daje nadzieje na wyłonienie metod spawalniczych, których stopiwa będą charakteryzowały się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi i plastycznymi [78, 79]. Właściwości takie są istotne dla pracy złącza spawanego znajdującego się w ramie pojazdu ciężarowego. W związku z powyższym przyjęto następującą tezę pracy:

1) W ocenie przydatności różnych metod spawalniczych do napraw ram pojazdów ciężarowych celowe jest uwzględnienie kryterium zawartości tlenu w stopiwie.

2) Naprawy i przebudowy wykonywane metodami spawalniczymi elementów nośnych pojazdów ciężarowych powinny być przeprowadzane z użyciem procesów niskotlenowych.

9. Zastosowanie kryterium tlenowego do wyboru metod spawalniczych do napraw oraz przebudów ram pojazdów ciężarowych

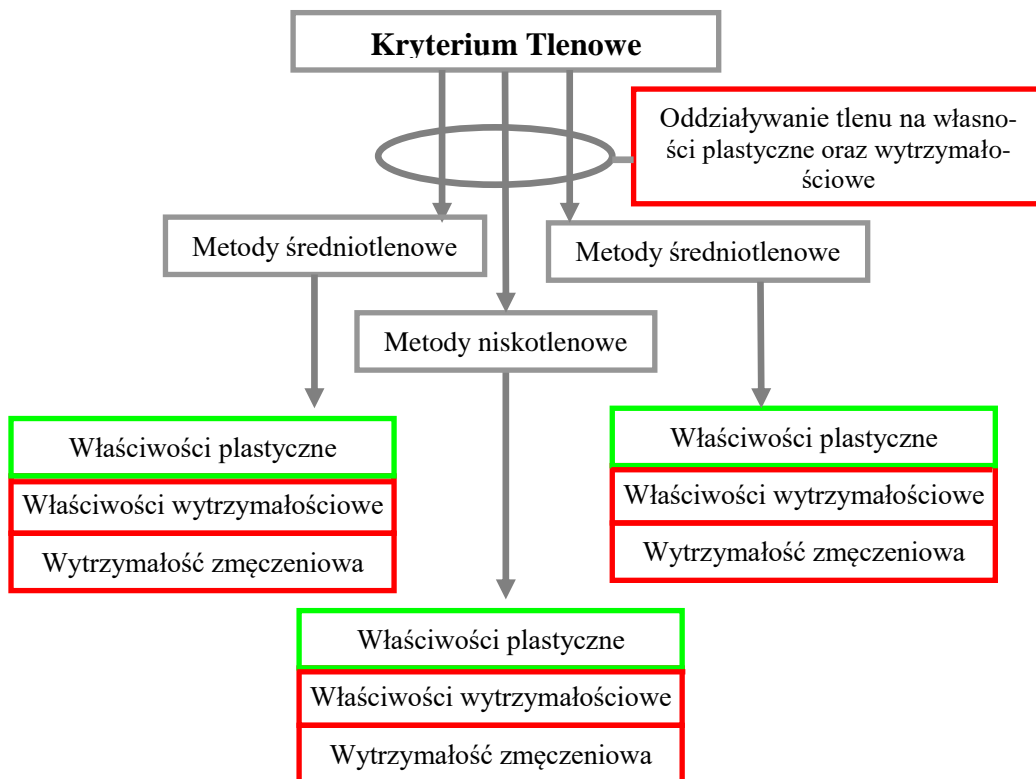
Przeгляд literatury dowodzi, że producenci pojazdów ciężarowych (z wyjątkiem polskich) zalecają do spawania ram, produkowanych przez siebie pojazdów, użycie procesów niskowodorowych. Wybór metod niskowodorowych był w świetle opisanych w literaturze badań uzasadnionym, bowiem obecność tego pierwiastka w złączu spawanym, może powodować, występowanie różnego typu wad, np.: rybie oczy, pęknięcia itp.. Obecność wodoru, w stopiwie przekładała się bezsprzecznie na pogorszenie własności plastycznych i wytrzymałościowych złączy spawanych. Rozpatrując kryterium bazujące na zawartości wodoru w stopiwie stwierdzić należy, iż jest to kryterium dobrze rozpoznane i opisane w literaturze [110÷113]. Przedstawiony jest wpływ zawartości wodoru na właściwości złączy jak również znane są mechanizmy odpowiedzialne za spadek własności połączeń [77]. Zestawienie schematyczne informacji opisujących kryterium wodorowe przedstawiono na rys. 28.



Rys. 28. Informacje dotyczące kryterium wodorowego (kolor zielony - właściwości poznane)

Tak rozpoznane kryterium może posłużyć za podstawę doboru metod spawalniczych do naprawy oraz przebudów ram pojazdów ciężarowych. W świetle obecnego stanu wiedzy kryterium wodorowe jest niewystarczające [80÷82]. Znacznie nowszym kryterium dzielącym metody spawalnicze jest kryterium tlenowe. Kryterium to dzieli ogół metod spawalniczych na procesy niskotlenowe, średniotlenowe oraz wysokotlenowe. Kryterium tlenowe nie jest znane i stosowane w budowie oraz eksploatacji pojazdów. W celu potwierdzenia postawionej tezy jest konieczna analiza oddziaływania różnej ilości tlenu na właściwości stalowych spoin, ponieważ informacja ta nie jest w literaturze podawana w sposób jednoznaczny [84÷98]. Konieczne jest poznanie wytrzymałości doraźnej oraz wytrzymałości zmęczeniowej stopiw o różnej zawartości tlenu, które są bardzo istotne dla bezpiecznej pracy złącza spawanego w ramie pojazdu ciężarowego. Dobre właściwości wytrzymałościowe ramy pojazdu ciężarowego są ważnym składnikiem bezpieczeństwa biernego.

W literaturze [80÷82] została opisana tylko udarność stopiw charakteryzujących się znacznymi udziałami ferrytu AF, nie podawano natomiast właściwości wytrzymałościowych oraz wytrzymałości zmęczeniowej. Zestawienie schematyczne informacji opisujących kryterium tlenowe przedstawiono na rys. 29.



Rys. 29. Informacje dotyczące kryterium wodorowego (kolor czerwony – brak informacji, kolor zielony - właściwości poznane)

Z rysunku 29 jednoznacznie wynika, że tylko wpływ zawartości tlenu na własności plastyczne spoin jest dobrze poznany. Badania prowadzone w ramach niniejszej pracy mają na celu ustalenie roli tlenu w formowaniu się drobnoziarnistego ferrytu AF. Badania wpływu tlenu w spoinie ramy pojazdu ciężarowego na zawartość drobnoziarnistego ferrytu AF nie były dotąd podejmowane i publikowane w literaturze światowej. Kolejnym celem badań jest ustalenie wpływu tlenu na wytrzymałość doraźną stopiwa oraz na jego wytrzymałość zmęczeniową. Dodatkowo sprawdzony zostanie pogląd odnośnie wpływu ilości tlenu w stopiwie na jego udarność [78, 80÷82].

10. Program badań i jego uzasadnienie

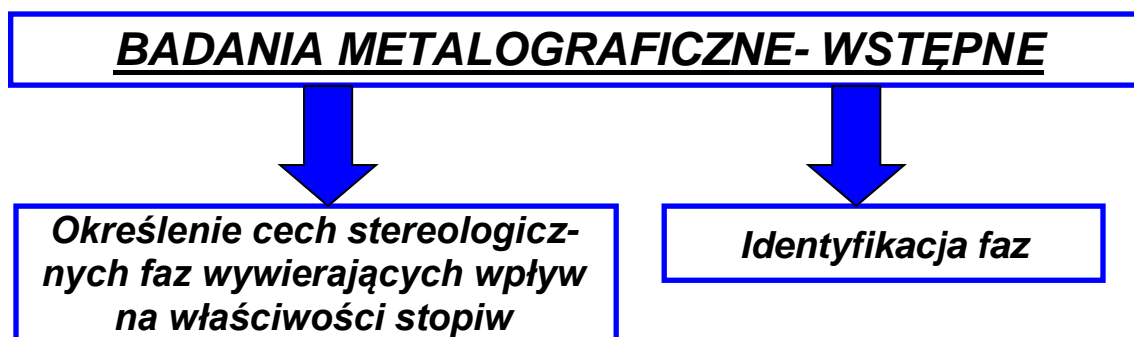
Pogląd na negatywne oddziaływanie wodoru w stopiwie jest podawany w literaturze w sposób jednoznaczny, natomiast pogląd na rolę tlenu nie jest w publikach ujednoczony. Pojawiały się sprzeczne ze sobą a nawet wykluczające się wzajemnie hipotezy. Niektórzy autorzy twierdzili, iż tlen należy w stopiwach ograniczać do minimum, inni twierdzili, iż istnieje pewna minimalna ilość tlenu, która sprzyja zarodkowaniu najkorzystniejszej pod względem własności plastycznych fazy – ferrytu drobnoziarnistego (*ferrytu AF*) [80÷82]. Poznanie wpływu ilości tlenu w stopiwach elektrodowych na formowanie drobnoziarnistego ferrytu AF jest celem badań wstępnych.

W literaturze powszechny jest pogląd, że drobnoziarnisty ferryt jest fazą o dobrych właściwościach plastycznych [80÷82]. Warunki pracy złącza spawanego znajdującego się w ramie pojazdu ciężarowego wymuszają, iż poza dobrymi właściwościami plastycznymi połączenia muszą charakteryzować się również dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi oraz wysoką wytrzymałością zmęczeniową. Potwierdzenie wysokich własności plastycznych oraz określenie wytrzymałości doraźnej oraz wytrzymałości zmęczeniowej stopiw charakteryzujących się wysokimi udziałami drobnoziarnistego ferrytu AF jest celem badań zasadniczych.

10.1. Plan badań wstępnych

Ustalenie faktycznej roli tlenu w stopiwach wykonanych zalecanymi przez producentów pojazdów ciężarowych metodami spawalniczymi wymagało przeprowadzenia szeregu badań o charakterze metalograficznym i spawalniczym. Badania takie muszą obejmować dokładne określenie zawartości tlenu w stopiwach. W hipotezach zakładających związek pomiędzy zawartością tlenu w stopiwach a własnościami plastycznymi często pojawiał się wątek wtrą-

ceń niemetalicznych. Istotna jest, wielkość wtrąceń oraz ich skład chemiczny. Wtrącenia o pewnych średnicach oraz określonym składzie chemicznym sprzyjają zarodkowaniu drobnoziarnistego ferrytu AF. Konieczne, więc było ustalenie średnic występujących w stopiach wykonanych różnymi metodami wtrąceń niemetalicznych oraz określenie ich składu chemicznego. Kolejną, istotną kwestią jest ustalenie procentowych udziałów poszczególnych odmian morfologicznych ferrytu w strukturach metalograficznych stopiów wykonanych metodami o różnej zawartości tlenu (*identyfikacja faz*). Szczególną uwagę zwrócić w tym etapie badań należy na udziały najkorzystniejszej fazy ferrytu drobnoziarnistego (*ferrytu AF*). Schematyczne przedstawienie kolejnych etapów badań wstępnych zamieszczono na rys. 30.



Rys. 30. Schemat badań wstępnych

Celem badań wstępnych jest ustalenie faktycznych związków pomiędzy zawartością tlenu w stopiowie, a udziałami drobnoziarnistego ferrytu w stopiach wykonanych metodami zalecanymi przez producentów pojazdów ciężarowych do naprawy i przebudowy ram pojazdów. Badania wstępne wyłoniły metody spawania, których stopiwo charakteryzuje się znacznymi udziałami drobnoziarnistego ferrytu. Drobnoziarnisty ferryt jest fazą charakteryzującą się dobrymi własnościami, istotnymi dla pracy złącza spawanego w ramie pojazdu ciężarowego. Analiza własności wytrzymałościowych oraz wytrzymałości zmęczeniowej stopiów o dużej zawartości drobnoziarnistego ferrytu AF jest celem badań zasadniczych.

10.2. Plan badań zasadniczych

Znając zależności występujące pomiędzy zawartością tlenu, a udziałami ferrytu drobnoziarnistego przeanalizowano własności mechaniczne złączy spawanych, w których stwierdzono występowanie dużych ilości drobnoziarnistego ferrytu AF. Analiza własności mechanicznych stopiów musiała być przeprowadzona z uwzględnieniem warunków pracy złączy spawa-

nych, znajdujących się w ramach pojazdów ciężarowych. Warunki pracy złącza spawanego występującego w ramie pojazdu ciężarowego w ogólności odpowiadały warunkom pracy ramy jako całości i jako takie są warunkami złożonymi. Samochód ciężarowy, podczas eksploatacji jest poddawany znacznym obciążeniom statycznym oraz dynamicznym (*opisane to stało w przeglądzie literatury*). Ramy pojazdów ciężarowych charakteryzują się wysoką udarnością, wysoką wytrzymałością doraźną oraz wysoką wytrzymałością zmęczeniową. Takimi cechami powinno również charakteryzować się złącze spawane znajdujące się w ramie pojazdu ciężarowego. Dodatkowo przeanalizowano udarność stopiw po wcześniejszym odkształceniu oraz wyprostowaniu. Taki sposób przygotowania próbek udarnościowych symulował złącza spawane znajdujące się w ramie pojazdu ciężarowego, która podczas eksploatacji została odkształcona oraz następnie naprawiona poprzez statyczne prostowanie.

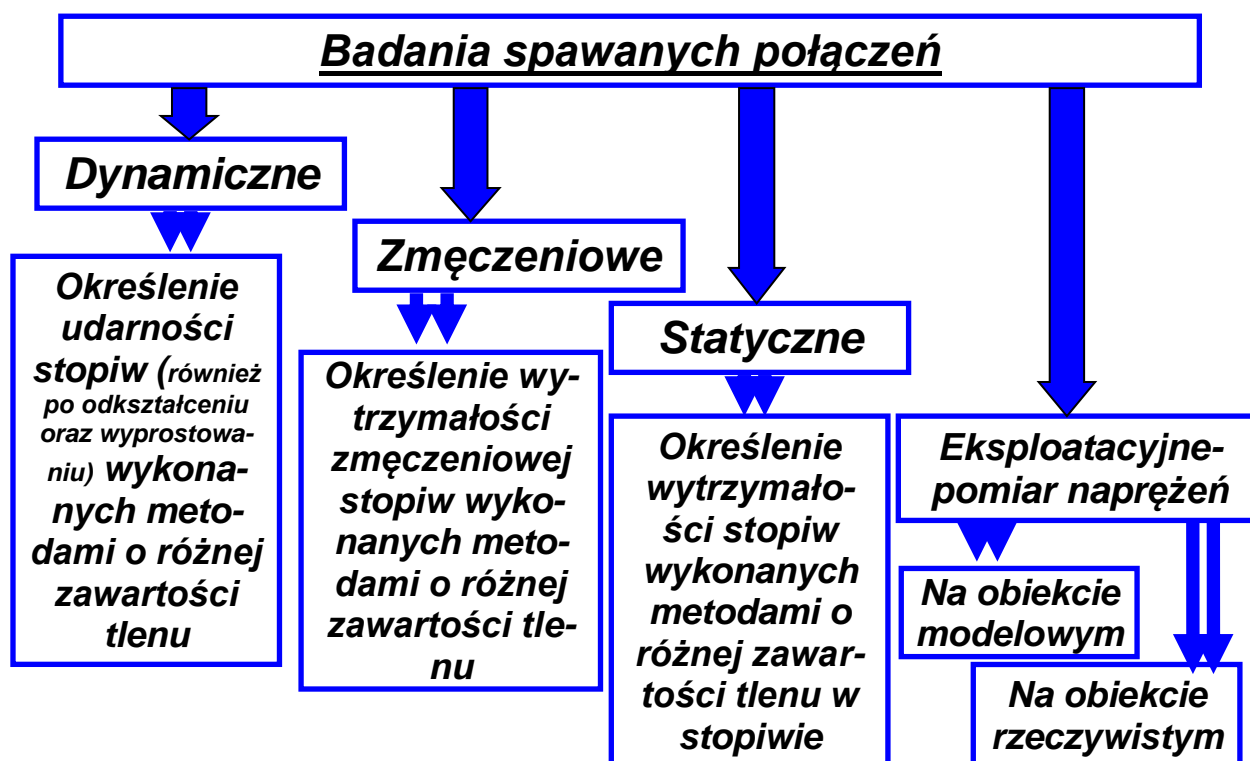
Ustalenie istotnych właściwości dla pracy złącza spawanego w ramie pojazdu ciężarowego wymagało przeprowadzenia szeregu badań. Badaniami tymi były:

- próba udarności stopiw (*również po odkształceniu oraz wyprostowaniu*) - odporność stopiwa elektrodowego na oddziaływanie naprężeń o charakterze dynamicznym,
- próba rozciągania stopiw - odporność stopiwa elektrodowego na naprężenia o charakterze statycznym,
- określenie wytrzymałości zmęczeniowej stopiw - określenie odporności stopiw na działanie stosunkowo niewielkich naprężeń, lecz stale się powtarzających.

Kolejnym punktem badań zasadniczych było określenie rzeczywistych wartości naprężeń występujących w ramach pojazdów ciężarowych. Analiza wartości naprężeń w elementach spawanej ramy nośnej pojazdu ciężarowego podzielona została na trzy etapy:

- określenie metodami analitycznymi wartości momentów gnących w podłużnicach ramy pojazdu ciężarowego,
- analizy numeryczne z wykorzystaniem programu MES,
- pomiar naprężeń w obiekcie rzeczywistym metodą tensometryczną.

Znajomość wartości naprężeń pozwoliła na interpretację wyników badań wytrzymałości na rozciąganie w odniesieniu do rzeczywistych warunków pracy złączy spawanych w ramach pojazdów ciężarowych. Schematyczne przedstawienie kolejnych etapów badań zasadniczych zamieszczono na rys. 31.



Rys. 31. Schemat badań zasadniczych

Ustalenie związku pomiędzy zawartością tlenu a udziałami drobnoziarnistego ferrytu AF w stopiowie elektrodowym (*co jest celem badań wstępnych*) oraz przeprowadzenie zaproponowanych badań zasadniczych pozwoli na potwierdzenie postawionej tezy.

11. Wytypowanie metod badawczych

Do stwierdzenia poprawności postawionej tezy koniecznym jest przeprowadzenie badań wstępnych, oraz badań zasadniczych. Badania wstępne (*zaproponowane w rozdziale 10.1*) mają dostarczyć informacji potrzebnych do sformułowania odpowiedzi na pytanie o związek pomiędzy zawartością tlenu w stopiowie a udziałami najkorzystniejszej pod względem własności plastycznych fazy, ferrytu drobnoziarnistego (*ferrytu AF*). W czasie prowadzenia badań wstępnych, do rozwiązywania poszczególnych problemów stosowano następujące metody badawcze:

- zawartość tlenu w stopiach - analiza z użyciem analizatora próżniowego „LECO TC-136”;
- średnice wtrąceń niemetalicznych występujących w stopiach - mikroskopia skaningowa- mikroskop „HITACHI S-3400N”;

- skład chemiczny wtrąceń niemetalicznych - mikroanaliza rentgenowska- mikroskop skaningowy „HITACHI S-3400N” z wykorzystaniem systemu mikroanalizy rentgenowskiej EDS;
- ustalenie udziałów procentowych drobnoziarnistego ferrytu AF w strukturze metalograficznej stopiw (*identyfikacja faz*)- mikroskopia świetlna (*obserwacja w powiększeniu 200x zglądów trawionych NITALEM*) oraz zastosowanie tzw. metody „siatkowej” zgodnie z wytycznymi Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa, podanymi w Dokumencie MIS-IX-1323-84.

Po ustaleniu związku pomiędzy zawartością tlenu w stopiwach a udziałami drobnoziarnistego ferrytu AF konieczne było stwierdzenie przydatności metod charakteryzujących się wyższą zawartością drobnoziarnistego ferrytu AF (*jak wynikało z literatury połączenia o lepszych właściwościach plastycznych*) do napraw oraz przebudów ram pojazdów ciężarowych.

Badania zasadnicze (*zaproponowane w rozdziale 10.2*) mają na celu ustalenie przydatności stopiw o dużej zawartości ferrytu AF do napraw i przebudów ram nośnych pojazdów ciężarowych. W czasie prowadzenia badań zasadniczych, do rozwiązywania poszczególnych problemów stosowano następujące metody badawcze:

- próby udarności stopiw- próby przeprowadzane na próbkach z karbem typu V w dwóch temperaturach +20°C oraz -40°C, próba prowadzona zgodnie z wytycznymi zawartymi w normach PN-EN 10045-1 oraz PN-EN 79 H-04371;
- próby rozciągania stopiw - próby prowadzone zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie PN-EN 1000-1:2004, próby prowadzone na urządzeniu MTS Insinght;
- określenie wytrzymałości zmęczeniowej stopiw - badania przygotowane oraz prowadzone zgodnie z wytycznymi podawanymi w Instrukcji Obsługi urządzenia do badania wytrzymałości zmęczeniowej MUJ-6000, próbki przygotowane zostały zgodnie z normą PN EN 76/H 04326, próby prowadzone na maszynie do badania wytrzymałości zmęczeniowej dla zginania obrotowego MUJ 6000;
- pomiaru rzeczywistych wartości naprężeń eksploatacyjnych w spawanej ramie pojazdu ciężarowego - pomiary tensometryczne poprzedzone analizą numeryczną z użyciem programu MSC Nastran, pomiary prowadzone z wykorzystaniem tensometrów wężykowych 1-LY 41-20/120 produkowanych przez firmę HBM., podczas pomiarów korzystano ze wzmacniacza pomiarowego SPYDER 8 firmy HBM oraz komputera typu Laptop.

11.1. Metody spawania objęte badaniami

Ze względu, iż zalecanymi przez producentów pojazdów ciężarowych metodami spawalniczymi są metody reprezentujące procesy nisko oraz średniotlenowe, grupę zalecanych metod spawalniczych przyjęto jako badaną grupę metod podstawowych. W pewnych badaniach niskotlenowa metoda MIG zastąpiona jest stopiwami wykonanymi metodą TIG, których to stopiwo charakteryzuje się równie niską zawartością tlenu, co stopiwo wykonane metodą MIG. Dodatkowo w celu określenia wpływu różnych ilości tlenu w stopiwie na zarodkowanie drobnoziarnistego ferrytu AF przebadane zostaną stopiwa elektrod wykonanych w warunkach laboratoryjnych. Stopiwa takie charakteryzują się bardzo zbliżonym składem chemicznym a różną zawartością tlenu.

12. Badania wstępne

Podawane w literaturze hipotezy odnośnie warunków sprzyjających zarodkowaniu drobnoziarnistego ferrytu AF w stopiwie elektrodowym nie są ze sobą spójne, a niektóre z nich wzajemnie się wykluczały. Autorzy pewnych publikacji twierdzili, iż z zarodkowaniem ferrytu AF związane są odpowiedniej jakości wtrącenia niemetaliczne występujące w danym stopiwie. Inni autorzy twierdzili, iż za korzystne zarodkowanie ferrytu AF odpowiedzialna jest odpowiednia szybkość chłodzenia. Badania wpływu tlenu w spoinie ramy pojazdu ciężarowego na zawartość drobnoziarnistego ferrytu AF nie były dotąd podejmowane i publikowane w literaturze światowej.

Celem badań wstępnych było ustalenie wpływu zawartości tlenu na zarodkowanie drobnoziarnistego ferrytu AF w metodach spawalniczych zalecanych przez producentów pojazdów ciężarowych. Zawartość tlenu była powiązana z wtrąceniami niemetalicznymi, te z kolei miały się przekładać na udziały drobnoziarnistego ferrytu AF w stopiwie.

12.1. Określenie zawartości tlenu w stopiwach wykonanych badaniami metodami oraz ich podział

Podstawową informacją konieczną do prowadzenia dalszych badań wpływu tlenu na formowanie się drobnoziarnistego ferrytu jest znajomość dokładnych zawartości tlenu w grupie badanych stopiw. W celu ustalenia zawartości tlenu w stopiwach wykonanych z użyciem standardowych materiałów dodatkowych wykonano z użyciem czterech (*EB, ER, MAG, TIG*)

metod objętych badaniami stopiwa próbne. Oznaczenia użytych materiałów jak również zastosowane parametry spawania przedstawiono w tablicy 5.

Tablica 5

Parametry spawania oraz gatunki użytych materiałów dodatkowych

Metoda spawania	Gatunek Elektrody/ Drutu spawalniczego	Średnica elektrody/ Drutu spawalniczego	Natężenie prądu spawania	Gaz osłonowy
Spawanie łukowe otulonymi elektrodami zasadowymi, EB	ESAB EB 1.50	4 mm	115 A	-----
TIG (GTAW)	ESAB OK Tigrod 13.09	4 mm	180 A	Argon (stopień czystości >99,9996%)
Spawanie łukowe otulonymi elektrodami rutylowymi, ER	ESAB ER 3.46	4 mm	115 A	-----
MAG (GMAW)	VDG 16/60	1,2 mm	100 A	Ar 80% CO ₂ 20%

Stopiwa poddano badaniam w próżniowym analizatorze LECO. Wyniki wraz z klasyfikacją stopiw wynikającą z kryterium tlenowego przedstawiono w tablicy 6.

Tablica 6

Podział metod spawalniczych ze względu na zawartość tlenu w ich stopiowie

Metoda spawania	Klasyfikacja ze względu na zawartość tlenu w stopiowie	Zawartość tlenu w stopiowie, ppm
Spawanie łukowe otulonymi elektrodami zasadowymi	Proces niskotlenowy	345
TIG (GTAW), MIG (GMAW)	Proces niskotlenowy	280
Spawanie łukowe otulonymi elektrodami rutylowymi	Proces średniotlenowy	650
MAG (GMAW)	Proces średniotlenowy	560

Dodatkowo przeanalizowano zawartość tlenu w stopiwie wykonanym elektrodami wykonanymi w warunkach laboratoryjnych. Do otuliny tych elektrod dodawane były pewne ilości utleniaczy w formie proszku (*np. Fe₃O₄ i MnO₂*) oraz pewne ilości substancji odtleniających stopiwo (*np. Al, Mg, Ti, Fe-Si*). Do wyprodukowania elektrod zastosowano drut elektrodowy o średnicy 4mm. Wskaźnik otulenia produkowanych laboratoryjnie elektrod wynosił w każdym przypadku 1,6. We wszystkich stopiwach zachowywano prawie stałą, charakterystyczną dla danego stopiwa zawartość azotu i innych składników stopiwa, ponieważ tylko w takich warunkach miarodajna może być ocena samego wpływu tlenu na własności stopiwa. Wykonane stopiwa zawierały ok. 0,07% węgla; ok. 0,7% manganu; ok. 0,3% krzemu, ok. 60 ppm N. Udziały procentowe związków wchodzących w skład otulin elektrod rutytowych oraz zawartość tlenu w stopiwach wykonanych tymi elektrodami przedstawiono w tablicy 7

Tablica 7

Stężenie tlenu w stopiwie elektrod rutytowych zawierających w otulinie zmienne wagowe ilości ważniejszych składników

TiO ₂ w otulinie, %	Fe ₃ O ₄ w otulinie, %	Fe-Si w otulinie, %	Al w otulinie, %	Mg w otulinie, %	O w stopiwie, ppm	Klasyfikacja wg. Kryterium tlenowego
50	-	-	1,5	-	502	Procesy średnio oraz wysokotlenowe
40	10	-	-	-	672	
30	15	-	-	-	748	
35	15	3	-	-	802	

Udziały procentowe związków wchodzących w skład otulin elektrod rutytowych oraz zawartość tlenu w stopiwach wykonanych tymi elektrodami przedstawiono w tablicy 8.

Tablica 8

Stężenie tlenu w stopiwie elektrod zasadowych zawierających w otulinie zmienne wagowe ilości ważniejszych składników

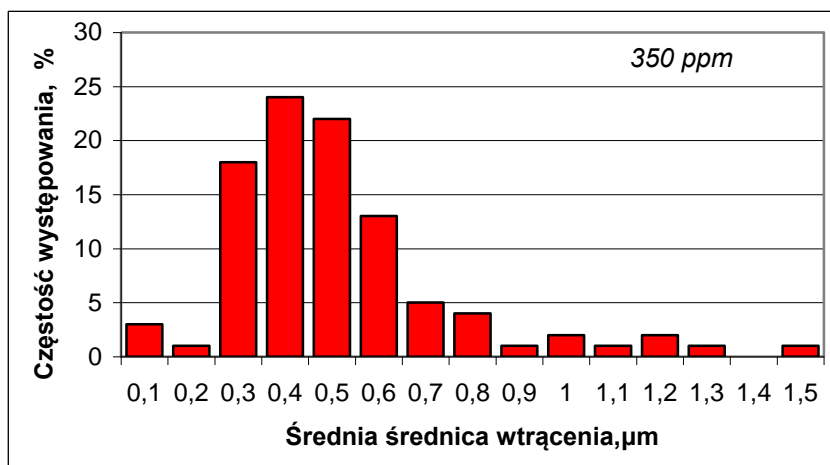
Fe ₃ O ₄ w otulinie, %	Fe-Si w otulinie, %	Al w otulinie, %	Mg w otulinie, %	Ti w otulinie, %	O w stopiwie, ppm	Klasyfikacja wg. kryterium tlenowego
5	7	-	-	-	396	procesy niskotlenowe
7,5	7	-	-	-	492	
10	7	2	1	1	443	
-	5	2	1	1	345	

Uzyskane wyniki potwierdziły informacje wynikające z danych literaturowych odnośnie podziału metod spawalniczych pod względem zawartości tlenu. Dodatkowo wykazano, iż najistotniejszym czynnikiem wpływającym na zawartość tlenu w stopiwie jest w przypadku spawania elektrodami otulonymi jest charakter ich otuliny. Zmienne zawartości składników utleniających oraz odtleniających w otulinie elektrod nie spowodowały na tyle istotnych zmian zawartości tlenu w stopiwie, aby zmienić klasyfikację metod pod względem zawartości tlenu. W przypadku spawania elektrodami otulonymi wielkością decydującą o zawartości tlenu w stopiwie jest charakter otuliny.

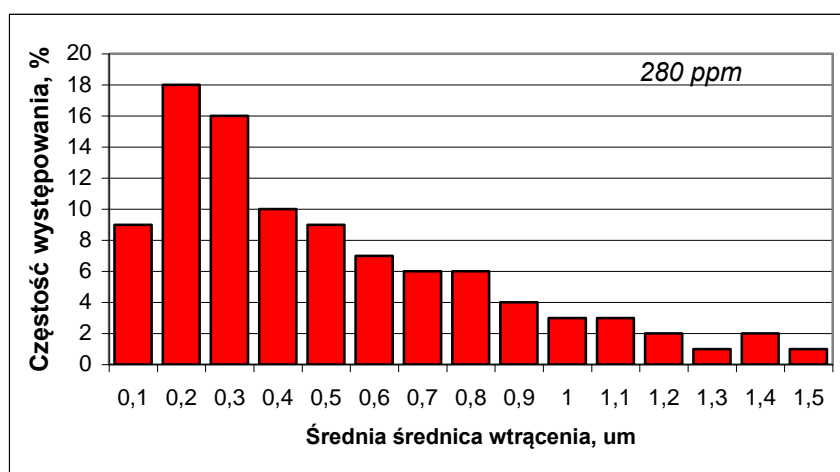
12.2. Określenie średnic oraz składu chemicznego ujawnionych wtrąceń niemetalicznych w badanych stopiwach

Przeanalizowano wielkości oraz skład chemiczny ujawnionych wtrąceń niemetalicznych. Analiza ta przeprowadzona została na przelomach stopiw wykonanych zalecanymi przez producentów pojazdów ciężarowych metodami spawania. Wielkości wtrąceń niemetalicznych ustalono obserwując przełomy stopiw na mikroskopie skaningowym z powiększeniem do 9000x. Badaniom poddano zarówno stopiwa wykonane standardowymi materiałami dodatkowymi jak również elektrodami, których otulina przygotowana została w warunkach laboratoryjnych (*tablice 7 i 8*).

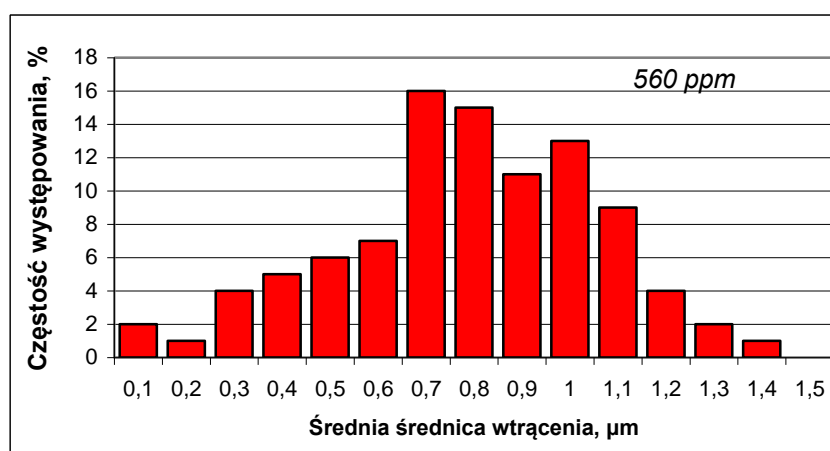
Średnie średnice ujawnionych wtrąceń niemetalicznych przedstawiono w formie wykresów obrazujących procentowe udziały danej średnicy wytracenia w ogóle ujawnionych wtrąceń. Przedstawione wyniki przeprowadzonych badań obejmowały tylko średnice wtrąceń najczęściej występujących nie brano pod uwagę pojedynczych wtrąceń o znacznie odbiegających wymiarach (*rys. 32÷35*).



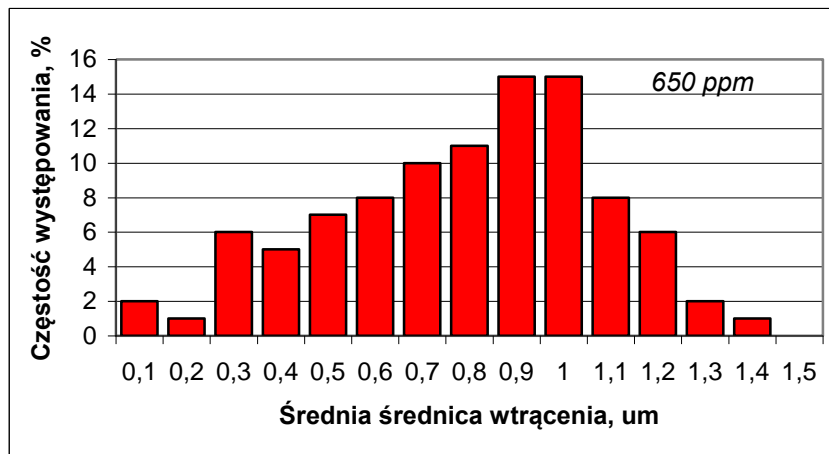
Rys. 32. Średnie średnice wtrąceń niemetalicznych ujawnionych w stopiwie wykonanym otuloną elektrodą zasadową (*metoda niskotlenowa*)



Rys.33. Średnie średnice wtrąceń niemetalicznych ujawnionych w stopiwie wykonanym TIG (*metoda niskotlenowa*)



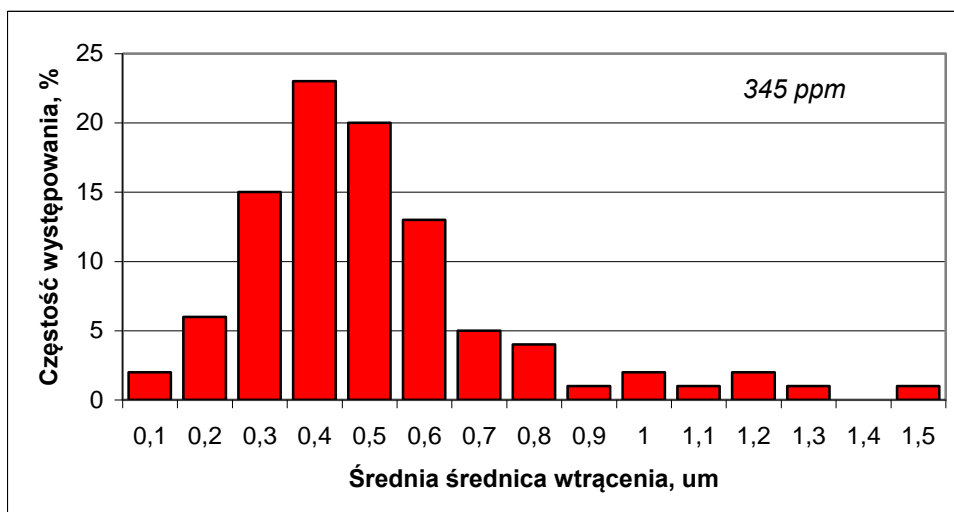
Rys.34. Średnie średnice wtrąceń niemetalicznych ujawnionych w stopiwie wykonanym metodą MAG (*metoda średniotlenowa*)



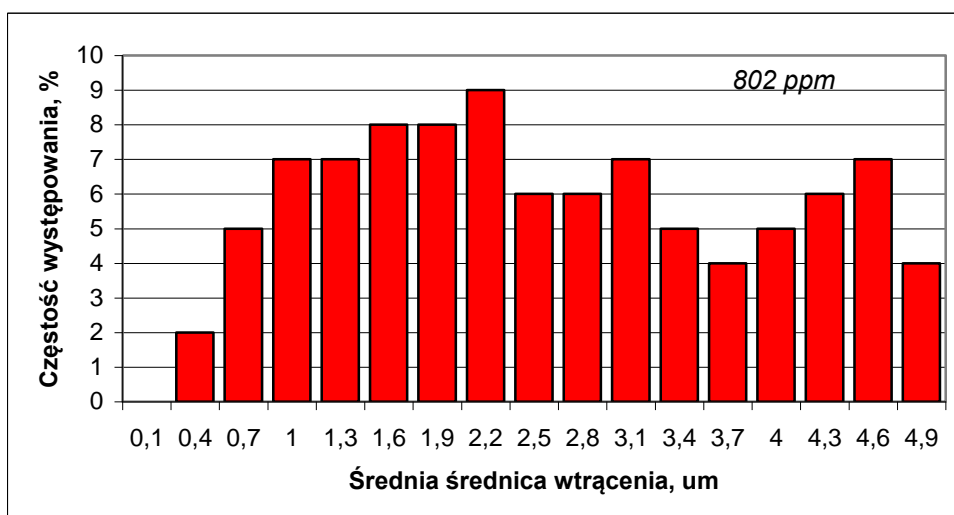
Rys.35. Średnie średnice wtrąceń niemetalicznych ujawnionych w stopiwie wykonanym otuloną elektrodą rutyłową (*metoda średniotlenowa*)

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na związek pomiędzy zawartością tlenu w stopiwie ze średnicami występujących w nich wtrąceń niemetalicznych. W stopiwach wykonanych procesami niskotlenowymi ujawniono wtrącenia o mniejszych średnicach. Zauważono, iż wtrąceń o wielkości ($0,4 \div 0,5 \mu\text{m}$), które miały najbardziej sprzyjać formowaniu drobnoziarnistego ferrytu AF [102÷105] było stosunkowo najwięcej w stopiwie wykonanym zasadowymi elektrodami otulonymi. Stopiwo takie posiadało 345 ppm tlenu.

Przeanalizowano również średnice wtrąceń, w stopiwach wykonanych elektrodami otulonymi przygotowanymi w warunkach laboratoryjnych. Analizie poddano stopiwa, w których uzyskano skrajnie różne zawartości tlenu. Analizie poddano stopiwo wykonane otuloną elektrodą zasadową, otulinie tej elektrody zawierała 5% Fe-Si, 2% Al, 1% Mg oraz 1% Ti. Stopiwo takie zawierało 345 ppm tlenu była to najmniejsza zawartość tlenu jaką udało się uzyskać w procesie spawania elektrodami przygotowanymi w warunkach laboratoryjnych. Największą zawartością tlenu spośród stopiw wykonanych elektrodami laboratoryjnymi charakteryzowało się stopiwo wykonane elektrodami o otulinie rutyłowej (35% TiO_2 , 15% oraz Fe_3O_4 w otulinie). Stopiwo takie charakteryzowało się zawartością tlenu na poziomie 800 ppm.

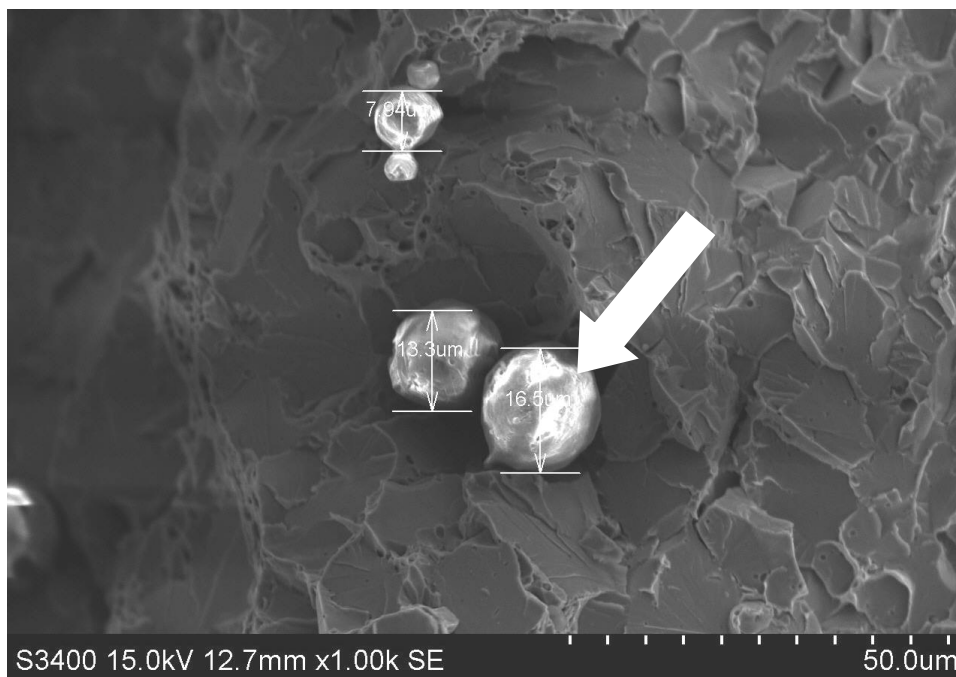


Rys. 36. Średnie średnice wtrąceń w stopiwie o zawartości tlenu 345 PPM, laboratoryjne elektrody zasadowe (5% Fe-Si, 2% Al, 1% Mg oraz 1% Ti w otulinie)



Rys. 37. Średnie średnice wtrąceń w stopiwie o zawartości tlenu 802 ppm, laboratoryjne elektrody rutyłowe (35% TiO₂, 15% Fe₃O₄ oraz 3% Fe-Si w otulinie)

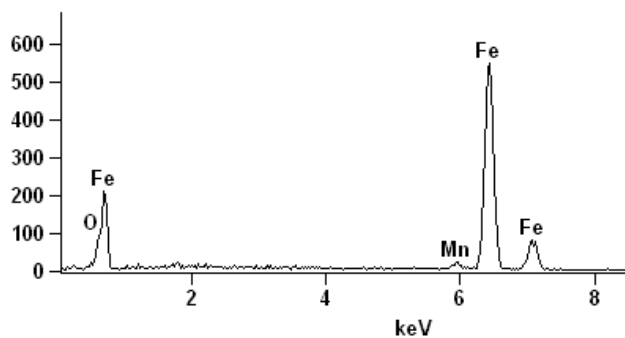
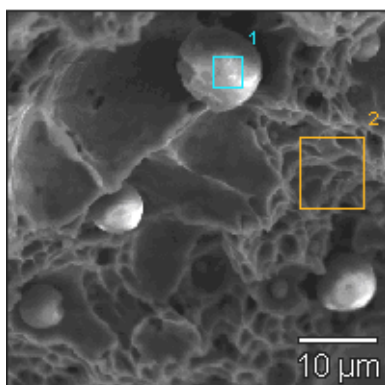
W przypadku badania stopiwa o bardzo dużej zawartości tlenu (802 ppm) wykonanego laboratoryjną elektrodą rutyłową –zaobserwowano znaczny rozrost wtrąceń niemetalicznych. W stopiwie było najwięcej (9%) wtrąceń o wielkości 2,2 μm, W stopiwie takim ujawniono wtrącenie o maksymalnej średnicy 16,5 μm (rys. 38.).



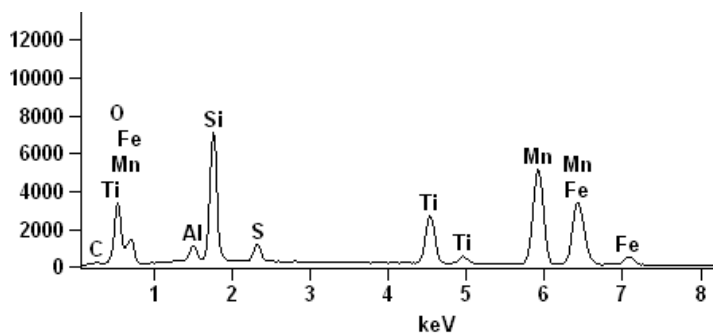
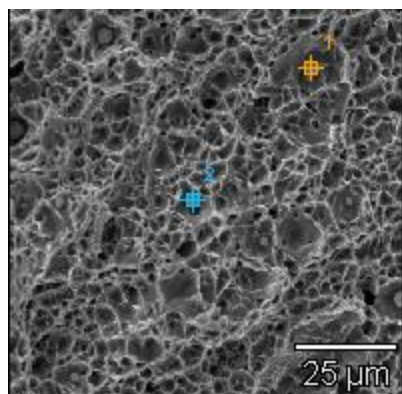
Rys. 38. Wtrącenie niemetaliczne o średnicy 16,5 μm ujawnione w stopiwie zawierającym 802 ppm tlenu

Występowanie tak dużych wtrąceń w stopiwie, w którym duża zawartość tlenu 802 ppm (*większa wartość niż w przypadku spawania standardowymi materiałami dodatkowymi*) wynikała z użycia laboratoryjnie przygotowanej elektrody, może potwierdzać zauważony związek pomiędzy zawartością tlenu w stopiwie a wielkościami wtrąceń niemetalicznych.

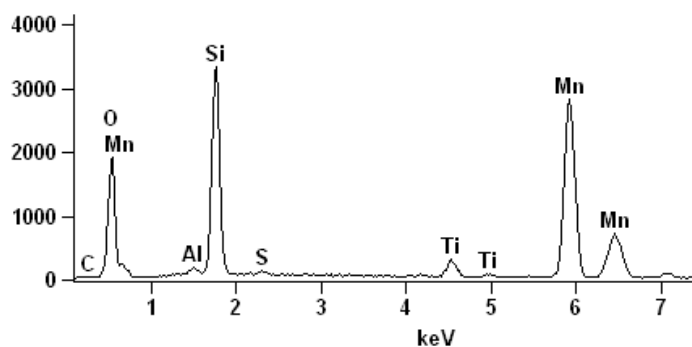
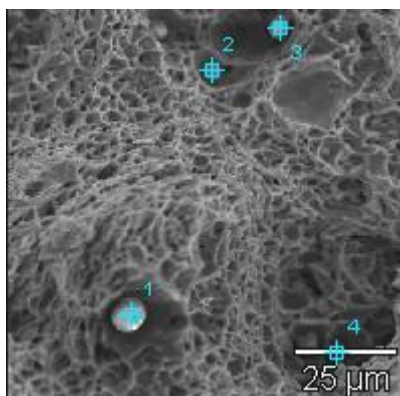
Fragmentem tej części badań jest analiza składu chemicznego ujawnionych w stopiwach wtrąceń. Analizę prowadzono z użyciem mikroskopu skaningowego wyposażonego w przystawkę do mikroanalizy rentgenowskiej. Badania te ograniczono tylko do stopiw wykonanych standardowymi materiałami dodatkowymi, stosowanymi do spawania ram pojazdów ciężarowych. Przeanalizowano skład chemiczny wtrąceń ujawnionych w stopiwach wykonanych z użyciem materiałów dodatkowych oraz z zachowaniem parametrów spawania przedstawionych w tabelicy nr 5. Wyniki przeprowadzonych badań składu chemicznego ujawnionych wtrąceń niemetalicznych przedstawiono na rysunkach 39÷ 42.



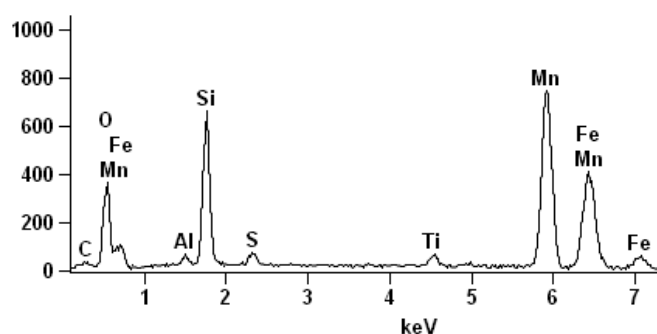
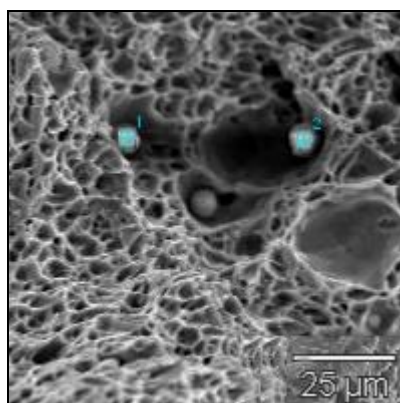
Rys. 39. Mikroanaliza rentgenowska wtrącenia niemetalicznego w stopiwie wykonanym elektrodami ER 3.46 (wtrącenie oznaczone jako 1)



Rys. 40. Mikroanaliza rentgenowska wtrącenia niemetalicznego w stopiwie wykonanym elektrodami EB 1.50 (wtrącenie oznaczone jako 1)



Rys. 41. Mikroanaliza rentgenowska wtrącenia niemetalicznego w stopiwie wykonaną metodą MAG (wtrącenie oznaczone jako 1)



Rys. 42. Mikroanaliza rentgenowska wtrącenia niemetalicznego w stopiowie wykonanym metodą TIG (wtrącenie oznaczone jako 2)

Pierwiastki wchodzące w skład ujawnionych wtrąceń niemetalicznych mogły tworzyć różne związki chemiczne. Z danych literaturowych wynika, iż istniały związki, które określane były mianem bardzo skutecznych pod względem zarodkowania drobnoziarnistego ferrytu AF oraz związki mniej skuteczne pod względem zarodkowania tej korzystniejszej fazy [101, 107, 108]. W stopiowach wykonanych metodami niskotlenowymi ujawniono pierwiastki mogące tworzyć związki uznawane za bardzo skuteczne pod względem zarodkowania ferrytu drobnoziarnistego. W stopiowach wykonanych metodami TIG oraz zasadowymi elektrodami otulonymi występowały takie pierwiastki jak: O, Al, Mn, Ti, S, Si. Mogły one tworzyć związki: $MnAl_2O_4$ (tzw. galaksyt), TiO , MnS . Są to związki podawane w literaturze jako bardzo skuteczne przy zarodkowaniu drobnoziarnistego ferrytu AF [78].

Pierwiastkami ujawnionymi w stopiowach wykonanych metodami średniotlenowymi (MAG oraz ER) były: Fe, Mn, O. Pierwiastki te mogą tworzyć związki FeO , MnO , które to są uważane za mniej skuteczne pod względem zarodkowania ferrytu AF [78].

12.3. Ustalenie zależności matematycznej pomiędzy wymiarami wtrąceń niemetalicznych a zawartością tlenu w stopiowie

W celu ustalenia matematycznej zależności pomiędzy zawartością tlenu w stopiowie, a średnią średnicą wtrąceń niemetalicznych wykorzystano wyniki przeprowadzonych już badań. Wykorzystano badania, które obejmowały stopiwa wykonane rutyłową i zasadową elektrodą otuloną, ponieważ tylko takie rodzaje elektrod są stosowane do spawania ram samochodów ciężarowych. Stosowano elektrody przemysłowe i wykonane laboratoryjnie w celu uzyskania stopiwa o większym i mniejszym stężeniu tlenu niż w przeciętnych stopiowach wykonanych elektrodami przemysłowymi. Stężenie tlenu w stopiowie zmieniano poprzez dodawanie składników utleniających (Fe_3O_4 i MnO_2) i redukujących (proszki Al , Mg , Ti , $Fe-Si$) do otulin

elektrod. Oznaczenia zawartości tlenu w stopiwie wykonywano analizatorem próżniowym „Leco TC-136”. Dla ograniczenia ubocznych czynników, mogących mieć wpływ na stężenie tlenu w stopiwie elektrod otulonych do spawania stosowano wyłącznie elektrody o średnicy 4 mm i wskaźniku otulenia 1,6. Zmienne zawartości tlenu w stopiwie elektrod otulonych w zależności od zawartości składników utleniających oraz redukujących w otulinach elektrod przedstawiono w tablicach 7 oraz 8.

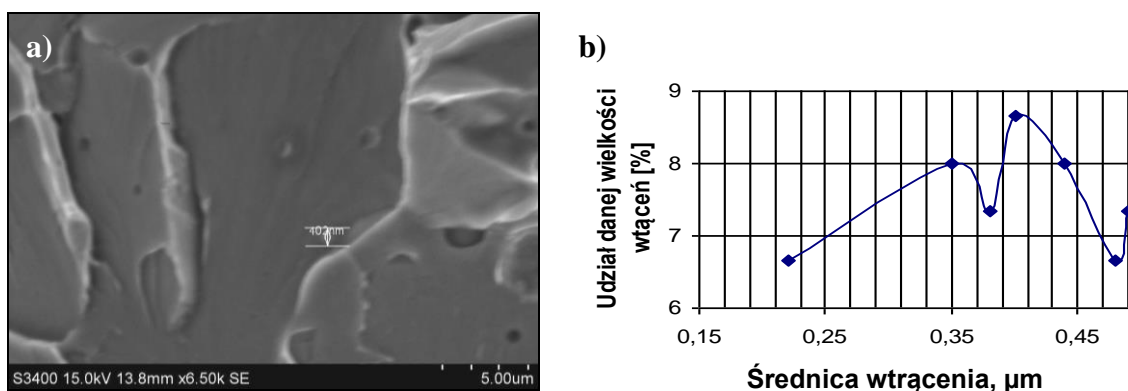
Wzrost zawartości tlenu w stopiwie ma wpływ na rozrost wtrąceń niemetalicznych. Zależność pomiędzy średnią wielkością wtrąceń a ilością tlenu przedstawiono w tabelicy 9.

Tablica 9

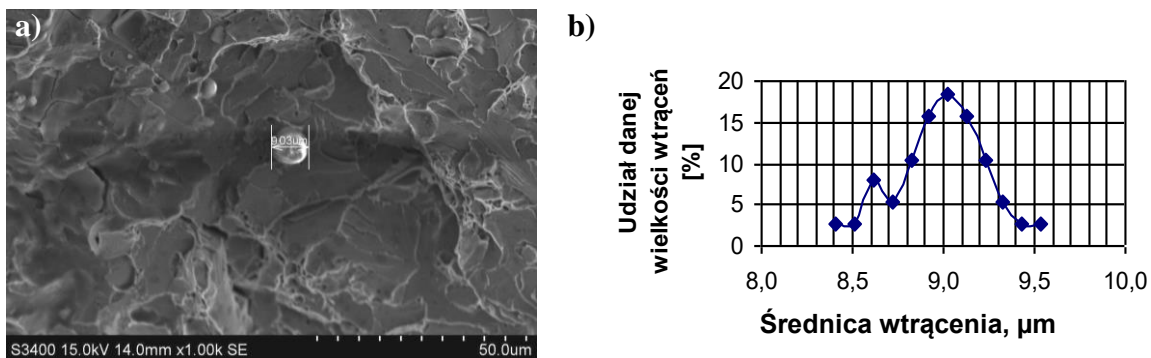
Stężenie tlenu w badanych stopiwach

Elektroda	Zawartość tlenu w stopiwie, ppm	Średnia średnica wtrącenia, μm
EB4	345	0,4
EB1	396	0,6
EB3	443	2
EB2	492	4
ER2	672	7
ER3	748	9

Widoczne jest wyraźnie, że począwszy od stężenia ok. 500 ppm tlenu w stopiwie gwałtownie rozrastają się wtrącenia niemetaliczne. Przykładowe wtrącenia o różnej średnicy i ich udział procentowy w badanych stopiwach przedstawiono na rysunkach 43, 44.



Rys. 43. a) Wtrącenie o średnicy 0,402 μm , ujawnione w stopiwie elektrod zasadowych, b)- udział danych średnic wtrąceń



Rys. 44. a) wtrącenie o średnicy 9,08 μm, ujawnione w stopiwie elektrod rutyłowych,
b) udział danej wielkości wtrąceń

Analiza średnich średnic wtrąceń w stopiwach o różnej zawartości tlenu pozwoliła na zaobserwowanie, że ilość tlenu w stopiwie wpływa na wielkość wtrąceń niemetalicznych. Im mniej tlenu w stopiwie, tym mniejsze wtrącenie. Na podstawie wyników badań przyjęto, że proces wzrostu wtrącenia niemetalicznego w zależności od stężenia tlenu w stopiwie można aproksymować funkcją kwadratową: $y = ax^2 + bx + c$. Współczynniki tej funkcji wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów. Obliczenia wykonano wykorzystując program *EXCEL*. Poniżej podano wyprowadzony wzór (6) ujmujący średnią średnicę wtrącenia niemetalicznego w zależności od zawartości tlenu w stopiwie i wykres funkcji (rys 46).

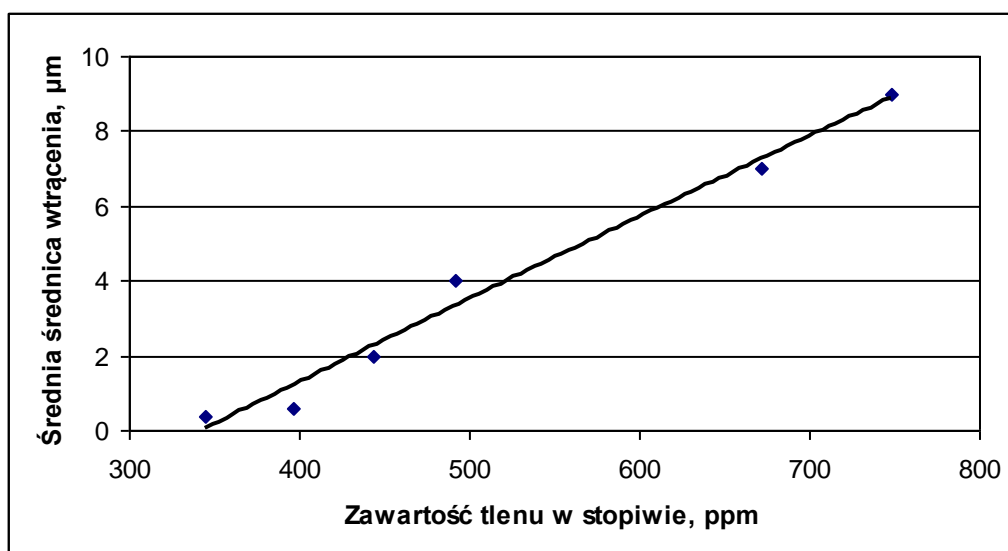
$$w = -0,006 t^2 + 0,0237 t - 7,9318 \quad (6)$$

gdzie:

w – średnia średnica wtrącenia, μm;

t - ilość tlenu w stopiwie, ppm.

Wyprowadzony wzór jest ważny dla niskostopowego stopiwa, w którym zawartość tlenu zawiera się w przedziale od 350 ppm do 750 ppm.



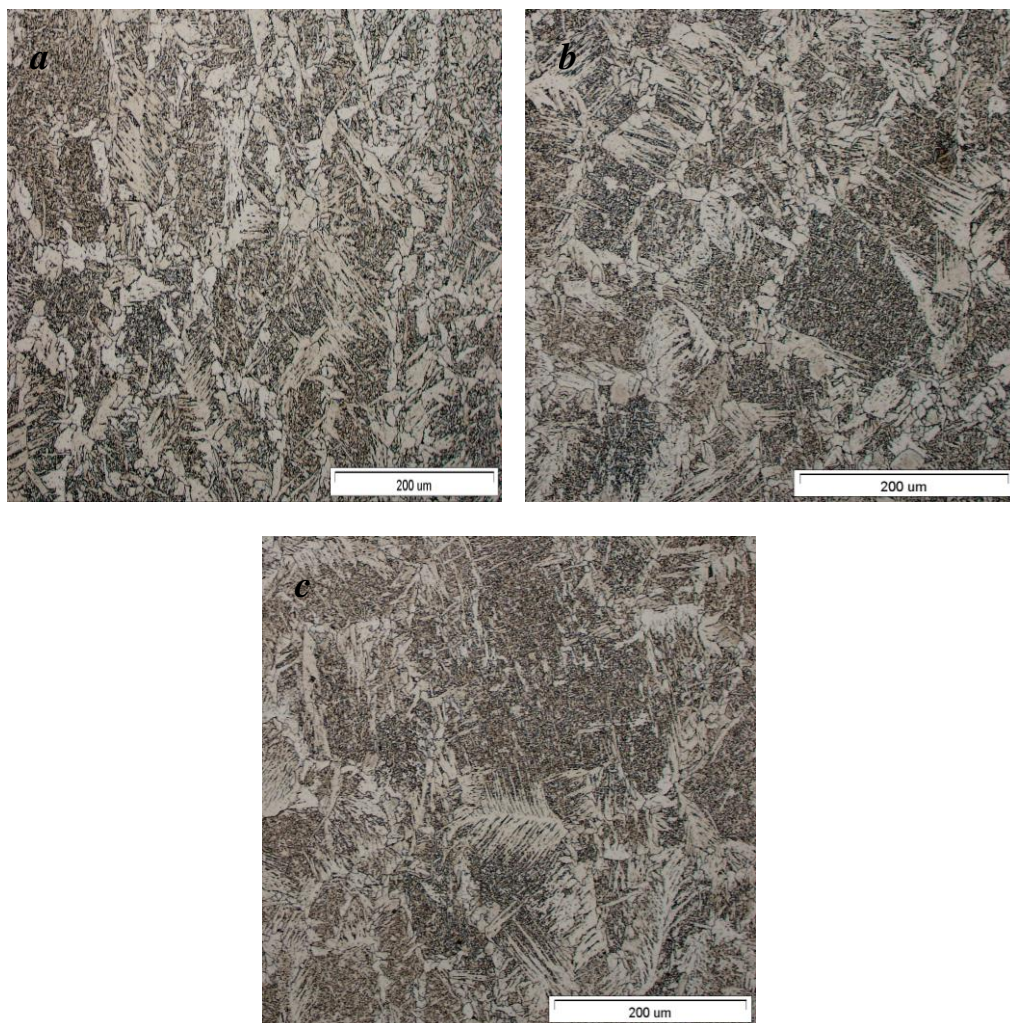
Rys. 45. Aproksymowana funkcja wraz z punktami empirycznymi

Na rysunku 45 przedstawiono przebieg wyznaczonej funkcji wraz z zaznaczonymi punktami empirycznymi. Współczynnik korelacji dla wyprowadzonego równania wynosi $R=0,997$. Wartość współczynnika bliska jedności świadczy o dobrym dopasowaniu wyprowadzonego równania do uzyskanych wartości empirycznych.

12.4. Określenie udziałów procentowych odmian morfologicznych ferrytu w strukturach metalograficznych stopiw (*identyfikacja faz*)

Zawartość drobnoziarnistego ferrytu określano za pomocą mikroskopii świetlnej stosując tzw. technikę „siatkową” zgodnie z wytycznymi Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa, podanymi w dokumencie MIS-IX-1323-84. Przeanalizowano strukturę stopiw wykonanych za pomocą elektrod rutyłowych, elektrod zasadowych, metodą MAG oraz TIG. W przypadku stopiwa wykonanego otuloną elektrodą rutyłową, przebadano stopiwa wykonane trzema różnymi gatunkami elektrody (*ER 1.42, ER 1.46 oraz ER 3.46*).

Struktury metalograficzne stopiw wykonanych elektrodami rutyłowymi przedstawiono na rysunku 46.



Rys. 46. Struktury metalograficzne stopiwy wykonanych różnymi otulonymi elektrodami rutyłowymi: a) ER 1.42, b) 1.46, c) ER 3.46, pow. x200

Na rysunku 46 można zauważyć różną zawartość drobnoziarnistego ferrytu AF, GBF i SPF. Metodą siatkową przeanalizowano przedstawione struktury. Procentowe udziały odmian morfologicznych ferrytów analizowanych struktur przedstawiono w tabelicy 10.

Tablica 10

Udziały procentowe odmian ferrytu w stopiwy elektrod rutyłowych

Oznaczenie elektrody służącej do wykonania stopiwa	AF, %	GBF, %	SPF, %	Pozostałe fazy (głównie fazy MAC), %
ER 1.42	28	57	10	5
ER 1.46	30	35	30	5
ER 3.46	41	20	30	5

W obserwowanych strukturach dało się zauważyć różne udziały najkorzystniejszej fazy stanowiącej o dobrych własnościach plastycznych tj. drobnoziarnistego ferrytu AF (*acicular ferrite*). W stopiwi elektrod ER 1.42 udział ferrytu AF wynosił 28%, dla stopiwa elektrod ER 1.46 udział ferrytu AF wynosił 30%, a w stopiwi elektrod ER 3.46 udział ferrytu AF wynosił 41%.

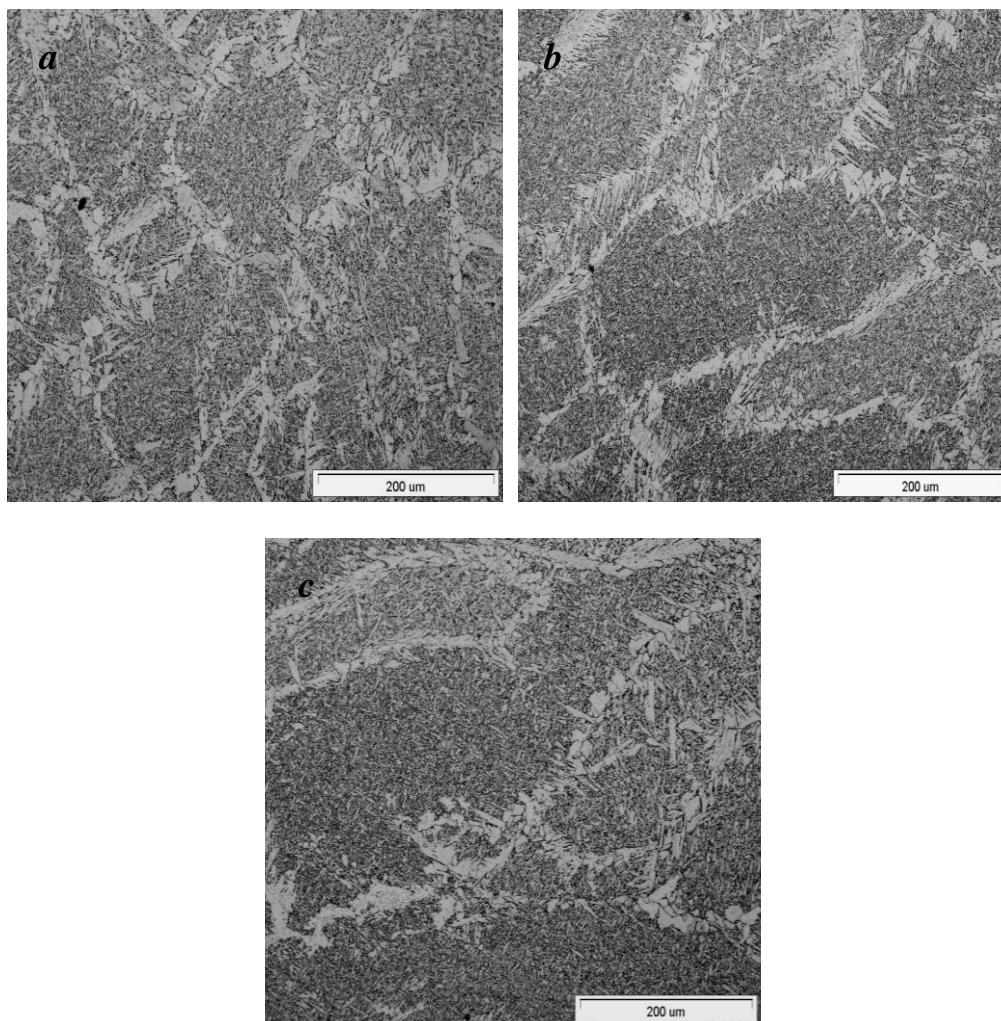
Kolejną metodą za pomocą, której wykonano badane stopiwo było spawanie standardowymi zasadowymi elektrodami otulonymi oraz elektrodami zasadowymi z dodatkiem molibdenu i niklu. W strukturach próbek wykonanych standardową elektrodą zasadową oraz elektrodą zasadową z dodatkiem molibdenu (0,4%) i niklu (1%) występowały większe ilości drobnoziarnistego ferrytu AF niż stopiwach wykonanych elektrodą rutyłową. Uzyskane wyniki przedstawiono tablicy 11.

Tablica 11

Udziały procentowe drobnoziarnistego ferrytu w stopiwi elektrod zasadowych

Elektroda zasadowa służąca do wykonania stopiwa	AF, %	GBF, %	SPF, %	Pozostałe fazy, głównie fazy MAC (martenzyt, austenit szczątkowy, węgliki), %
EB 1.50	55	30	10	5
EB z dodatkiem 0,4% molibdenu	60	20	15	5
EB z dodatkiem 1% niklu	63	19	13	5

Analizowane struktury stopiw elektrod zasadowych przedstawiono na rysunku 47.



Rys. 47. Struktura metalograficzna stopiwa wykonanego a) elektrodą EB 1.50, b) elektrodą z dodatkiem 0,4% molibdenu, c) elektrodą z dodatkiem 1% niklu, temp. łamania -40°C , pow. x200

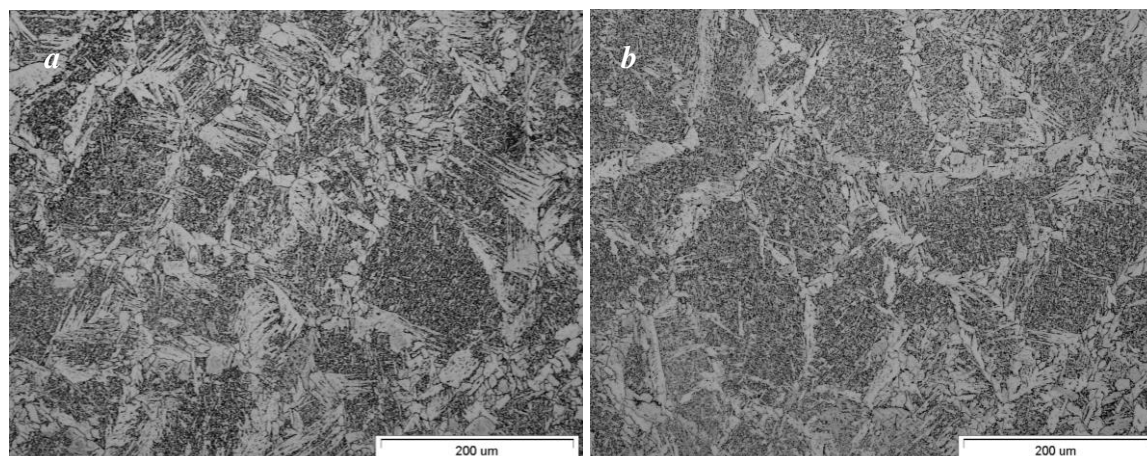
Kolejnym analizom poddano struktury wykonane standardowymi metodami spawania MAG oraz TIG. Wyniki uzyskane z analizy tych struktur przedstawiono w tablicy 12.

Tablica 12

Udziały procentowe drobnoziarnistego ferrytu w stopiwach wykonanych metodami MAG i TIG

Elektroda służąca do wykonania stopiwa	AF, %	GBF, %	SPF, %	Pozostałe fazy, głównie fazy MAC (martenzyt, austenit szczątkowy, węgliki), %
MAG	47	35	10	8
TIG	52	34	12	2

Analizowane struktury przedstawiono na rysunku 48.



Rys. 48. Struktura metalograficzna 200x stopiwa wykonanego metodą a) MAG, b) TIG , pow. x200

Badaniom metalograficznym poddano również stopiwa wykonane za pomocą elektrod zasadowych i rutyłowych, których otuliny wykonane zostały w warunkach laboratoryjnych. Stopiwa uzyskane przy użyciu przygotowanych, laboratoryjnych elektrod charakteryzowały się różnymi zawartościami tlenu. Zróżnicowana zawartość tlenu wynikała z różnych udziałów procentowych składników utleniających oraz odtleniających w otulinie (*tablice 9 i 10*). Udziały powierzchniowe drobnoziarnistego ferrytu AF oraz odpowiadające im stężenia tlenu w analizowanych stopiwach zestawiono w tabelicy 13.

Tablica 13

Stężenie tlenu w badanych stopiwach

Elektroda	Zawartość tlenu w stopiwie, ppm	Udział powierzchniowy ferrytu AF w stopiwie, %
EB4	345	64
EB1	396	60
EB3	443	55
EB2	492	52
ER2	672	42
ER3	748	38

We wszystkich analizowanych strukturach dało się zauważyć związek występujący pomiędzy zawartością tlenu w stopiwie a udziałami drobnoziarnistego ferrytu AF. Wraz ze zmniejszającą się ilością tlenu w stopiwach obserwowano zwiększającą się zawartością drobnoziarnistego ferrytu AF.

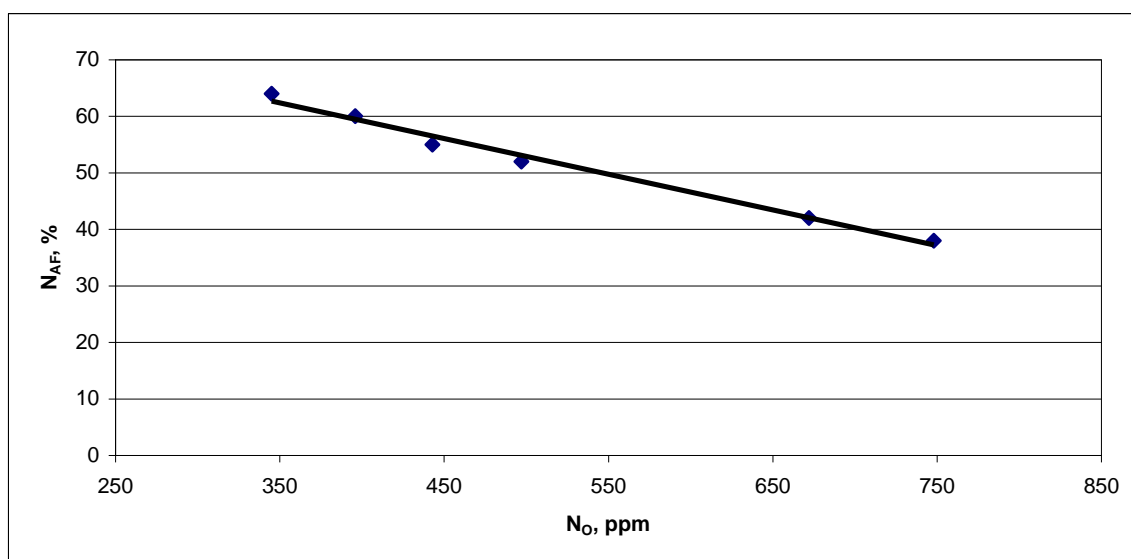
Na podstawie wyników analizy struktur stopiw wykonanych elektrodami wyprodukowanymi w warunkach laboratoryjnych przyjęto, że proces zarodkowania drobnoziarnistego ferrytu AF w zależności od stężenia tlenu w stopiwie można aproksymować funkcją liniową $y = ax + b$. Współczynniki tej funkcji wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów. Obliczenia wykonano wykorzystując program *EXCEL*. Poniżej podano wyprowadzony wzór (7) ujmujący udziały drobnoziarnistego ferrytu AF w strukturze metalograficznej stopiwa w zależności od zawartości tlenu w tym stopiwie.

$$a = -0,0631 t + 84,42 \quad (7)$$

gdzie:

- a – powierzchniowy, procentowy udział drobnoziarnistego ferrytu AF w stopiwie, %;
- t - ilość tlenu w stopiwie, ppm.

Wyprowadzony wzór jest ważny dla niskostopowego stopiwa, o zawartości tlenu od 350 ppm do 750 ppm. Na rys. 49 przedstawiono wykres wyznaczonej funkcji, wykonany w programie *EXCEL*.



Rys. 49. Wpływ zawartości tlenu (N_O) na udział ferrytu drobnoziarnistego (N_{AF})

Współczynnik korelacji dla wyprowadzonego równania wynosi $R = 0.994$. Bliska jedności wartość współczynnika świadczy o dobrym dopasowaniu modelu do danych empirycznych.

12.5. Omówienie wyników badań wstępnych

Badania wstępne rozpoczęto od ustalenia zawartości tlenu w stopiwach objętych badaniami. Ustalono, iż metody spawania objęte badaniami reprezentują procesy nisko oraz średniotlenowe. Ustalenie takie potwierdziło informacje wynikające z publikacji o podziale metod spawalniczych pod względem zawartości tlenu w stopiwie [80].

Kolejnym etapem badań wstępnych było ustalenie wymiarów wtrąceń niemetalicznych występujących w stopiwach charakteryzujących różną zawartością tlenu. Wyniki przeprowadzonych badań wskazały iż występuje silny związek pomiędzy zawartością tlenu a wielkością wtrąceń niemetalicznych. W stopiwie wykonanym standardowymi, zasadowymi elektrodami otulonymi (*metod niskotlenową o zawartości tlenu około 340 ppm*) wtrąceniami najliczniej występującymi były wtrącenia o średnicy $0,4 \div 0,5 \mu\text{m}$. W stopiwie o zawartości tlenu 802 ppm wykonanym rutyłową elektrodą przygotowana w warunkach laboratoryjnych ujawniono wtrącenie o średnicy $16,5 \mu\text{m}$. Było to, zatem wtrącenie ponad 33 razy większe od tych, jakie występowały w większości w stopiwie wykonanym procesem niskotlenowym. Analizując wielkości wtrąceń występujące w stopiwach wykonanych elektrodami laboratoryjnymi ustalono związek pomiędzy zawartością tlenu a średnią średnicą wtrąceń, opisany równaniem (4).

$$w = -0,006 t^2 + 0,0237 t - 7,9318 \quad (4)$$

gdzie:

- w – średnia średnica wtrącenia, μm ;
- t - ilość tlenu w stopiwie, ppm.

Następnym etapem badań wstępnych była analiza metalograficzna struktur spoin w ramach nośnych pojazdów ciężarowych wykonanych metodami charakteryzującymi się różną zawartością tlenu oraz występowaniem wtrąceń niemetalicznych o różnych wielkościach. Z danych literaturowych wynika, że struktura stopiwa elektrodowego składała się z trzech odmian morfologicznych ferrytu:

- gruboziarnistego ferrytu - oznaczonego wg. Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa oznaczonego jako GBF (*grain boundary ferrite*);
- płytkowego ferrytu oznaczonego wg. Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa oznaczonego jako PF (*primary ferrite*);

- drobnoziarnistego, ferrytu oznaczonego wg. Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa oznaczonego jako AF (*acicular ferrite*).

Poza wymienionymi odmianami ferrytu wchodzącego w skład struktury metalograficznej stopiwa występowały również pewne ilości tzw. faz MAC (*martenzyt, austenit, węgliki*). Najkorzystniejszą pod względem własności plastycznych stopiwa jest ferryt drobnoziarnisty (wg *MIS. acicular ferrite*). Ustalenie udziałów najkorzystniejszej fazy stopiwa stanowiło cel analizy metalograficznej struktur stopiw. Przeprowadzone badania uwiarykowały, iż stosunkowo najwięcej (*do 63%*) drobnoziarnistego ferrytu znajdowało się w stopiwach, gdzie ujawniono występowanie wtrąceń niemetalicznych o rozmiarach rzędu $0,4\div 0,5\ \mu\text{m}$ czyli w stopiwach wykonanych metodami niskotlenowymi o zawartości tlenu około 340 ppm. Ustalono też zależność że zwiększająca się zawartość tlenu w stopiwie powoduje rozrost wtrąceń niemetalicznych – co zmniejsza udział drobnoziarnistego ferrytu AF. Ustalając związek pomiędzy zawartością tlenu i udziałami drobnoziarnistego ferrytu AF za pomocą metody najmniejszych kwadratów wyprowadzono zależność:

$$a = - 0,0631 t + 84,42 \quad (5)$$

gdzie:

- a – powierzchniowy, procentowy udział drobnoziarnistego ferrytu AF w stopiwie, %;
- t - ilość tlenu w stopiwie, ppm.

Podsumowując badania wstępne stwierdzić należy, iż w badanym obszarze metod spawalniczych tlen zawarty w stopiwie ma wpływ na zawartość drobnoziarnistego ferrytu AF w strukturze metalograficznej stopiwa. Mechanizm zarodkowania drobnoziarnistego ferrytu AF jest związany z występowaniem wtrąceń niemetalicznych o odpowiedniej wielkości i składzie chemicznym. Można było sformułować wniosek, że występuje pewna optymalna zawartość tlenu w stopiwie (*około 340 ppm*), która gwarantuje powstawanie wtrąceń niemetalicznych o wielkościach rzędu $0,4\div 0,5\ \mu\text{m}$. Wtrącenia takie jak wykazano w badaniach, są najskuteczniejsze pod względem zarodkowania drobnoziarnistego ferrytu AF. Większe od optymalnej zawartości tlenu w stopiwie powodują znaczny rozrost wtrąceń niemetalicznych i tym samym obniżają ich potencjał w zarodkowaniu drobnoziarnistego ferrytu AF.

Ilości tlenu mniejsze od wartości optymalnej przekładają się na mniejsze rozmiary wtrąceń niemetalicznych, na których również mniej skutecznie zarodkuje drobnoziarnisty ferryt AF. Zauważono jednak iż zarodkowanie drobnoziarnistego ferrytu na wtrąceniach mniejszych od

optymalnych ($0,4 \pm 0,5 \mu m$) jest efektywniejsze niż zarodkowanie na wtrąceniach o rozmiarach większych od optymalnych.

Wyniki badań wstępnych o charakterze metalograficznym wykazały związek pomiędzy zawartością tlenu w stopiwie, a udziałami drobnoziarnistego ferrytu AF. Z literatury wynikało, że drobnoziarnisty ferryt AF jest fazą charakteryzującą się dobrą plastycznością. Wykazano, iż istnieje pewna zawartość tlenu w stopiwie (*około 350ppm*), która poprzez zaistnienie różnego rodzaju mechanizmów (*wielkość wtrąceń niemetalicznych, ich skład chemiczny*) powoduje, iż stopiwo o takiej zawartości tlenu charakteryzuje się stosunkowo największymi udziałami drobnoziarnistego ferrytu. Określenie wytrzymałości doraźnej i wytrzymałości zmęczeniowej spoin w ramach nośnych pojazdów ciężarowych wykonanych metodami niskotlenowymi (*o dużych udziałach ferrytu AF*) jest celem badań zasadniczych. Własności te są istotne dla pracy złącza w ramie pojazdu ciężarowego. Dodatkowo w ramach badań zasadniczych sprawdzona zostanie udarność stopiwa niskotlenowego.

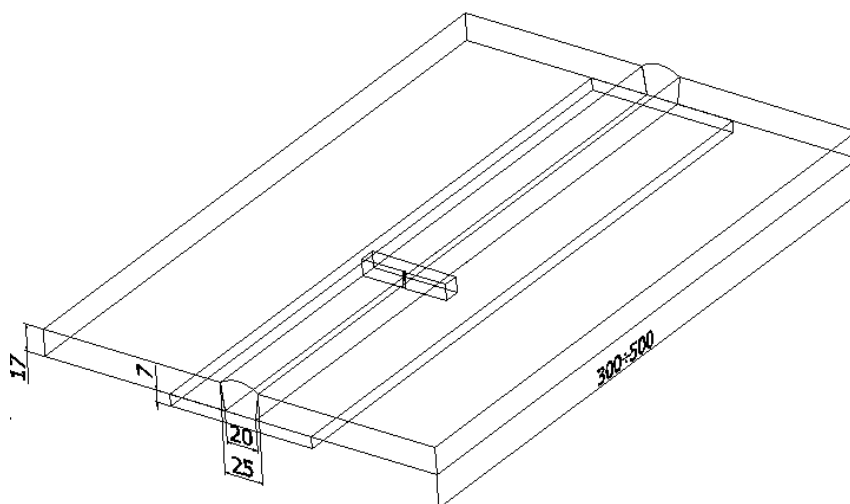
13. Badania zasadnicze

W celu stwierdzenia, że stopiwa niskotlenowych metod spawania (*charakteryzujących się dużymi udziałami ferrytu AF*) wykazują się lepszymi własnościami (*wytrzymałością doraźną, wytrzymałością zmęczeniową oraz udarnością*) od stopiw o większej zawartości tlenu konieczne było przeprowadzenie szeregu badań. Badania pozwalające ustalić właściwości plastyczne i wytrzymałościowe dla stopiw charakteryzujących się różnymi zawartościami tlenu stanowiły obszar badań zasadniczych.

Podczas eksploatacji pojazdów ciężarowych na ramy nośne oddziałują obciążenia o charakterze statycznym, dynamicznym oraz zmęczeniowym. Badania zasadnicze musiały, zatem obejmować ustalenie wytrzymałości doraźnej, wytrzymałości zmęczeniowej oraz udarności badanych stopiw. Dodatkowo, aby była możliwa analiza otrzymanych wyników była konieczna znajomość wartości rzeczywistych naprężeń występujących w ramach pojazdów ciężarowych. Pomiar wartości rzeczywistych naprężeń występujących w spawanej ramie pojazdu ciężarowego podczas jej eksploatacji stanowił jeden z punktów badań zasadniczych.

13.1. Udarność stopiw

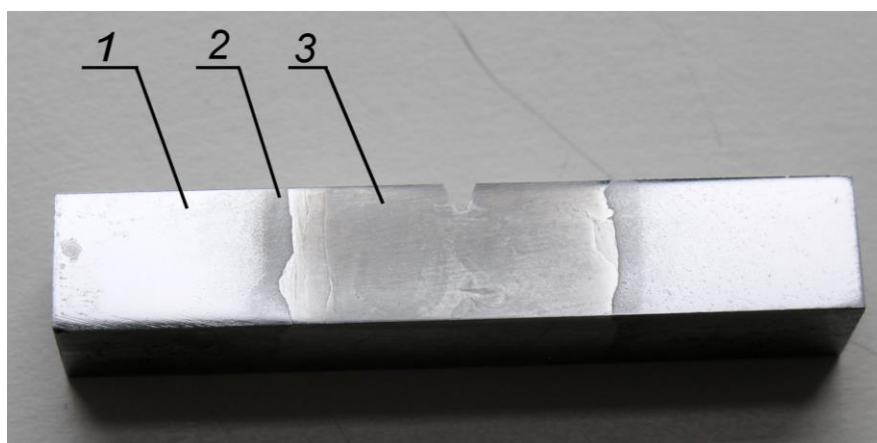
Badane stopiwa przygotowano zgodnie z wytycznymi normy PN-EN87/M-69772. Sposób wykonania spoiny, z której wykonane zostały próbki udarnościowe przedstawiono na rysunku 50.



Rys. 50. Sposób przygotowania badanego stopiwa oraz pobrania próbki

Do wykonania wszystkich badanych stopiw została wykorzystana stal S355J2G3 (18G2A wg. PN), powszechnie stosowana jako materiał do produkcji ram pojazdów ciężarowych [9, 10, 11, 28, 35, 41, 42÷46]. Dla każdego stopiwa i dla każdego warunków pomiaru (*temp.* $+20^{\circ}\text{C}$ oraz -40°C) analizowano energię łamania pięciu próbek.

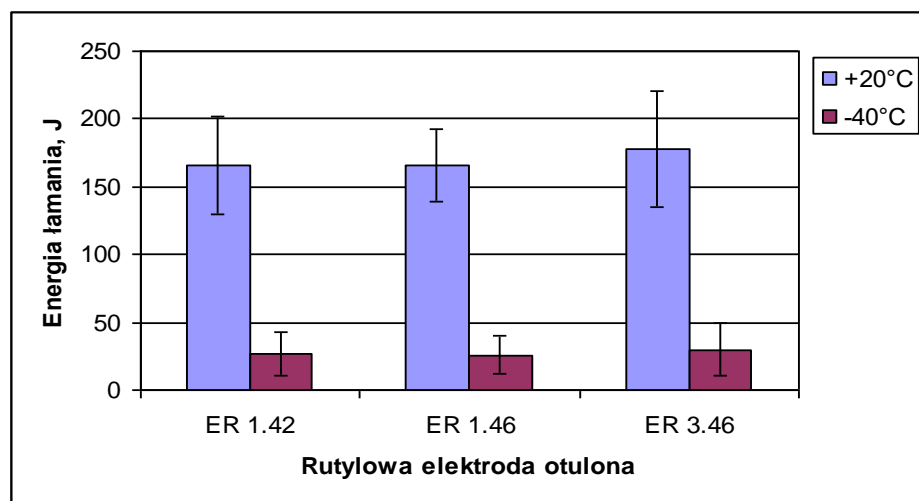
Przykładową próbkę udarnościową użytą w badaniach przedstawiono na rys. 51. Powierzchnia próbki została wytrawiona NITALEM w celu uwidocznienia charakterystycznych stref złącza spawanego w tym min. stopiwa, w którym nacięty został karb.



Rys. 51. Próbkę udarnościową stopiwa z uwidocznionymi charakterystycznymi strefami złącza spawalnego: 1- materiał rodzimy, 2- strefa wpływu ciepła, 3- spoina

Badania udarności prowadzono temperaturze dodatniej oraz ujemnej ($+20^{\circ}\text{C}$ oraz -40°C). Badania przeprowadzone zostały zgodnie z normami PN-EN 10045-1 oraz PN-EN 79 H-04371.

Badania udarności stopiw rozpoczęto od przeanalizowania udarności stopiw wykonanych trzema gatunkami otulonych elektrod rutytowych. Przebadano stopiwo wykonane otulonymi elektrodami rutyłowymi w ER 1.42, ER 1.46 oraz ER 3.46. Badania wstępne wykazały, iż struktury metalograficzne stopiw wykonanych trzema badanymi odmianami elektrod rutytowych posiadały podobne zawartości drobnoziarnistego ferrytu AF. Stwierdzono wówczas, iż gatunek materiału dodatkowego ma stosunkowo niewielki wpływ na strukturę metalograficzną stopiwa. Postanowiono również przeanalizować wpływ gatunku materiału dodatkowego na własności plastyczne stopiwa. Wyniki badań udarności w temperaturze dodatniej oraz ujemnej stopiw wykonanych trzema odmianami elektrod rutytowych przedstawiono na rys. 52. Wyniki stanowią średnią z pięciu prób.

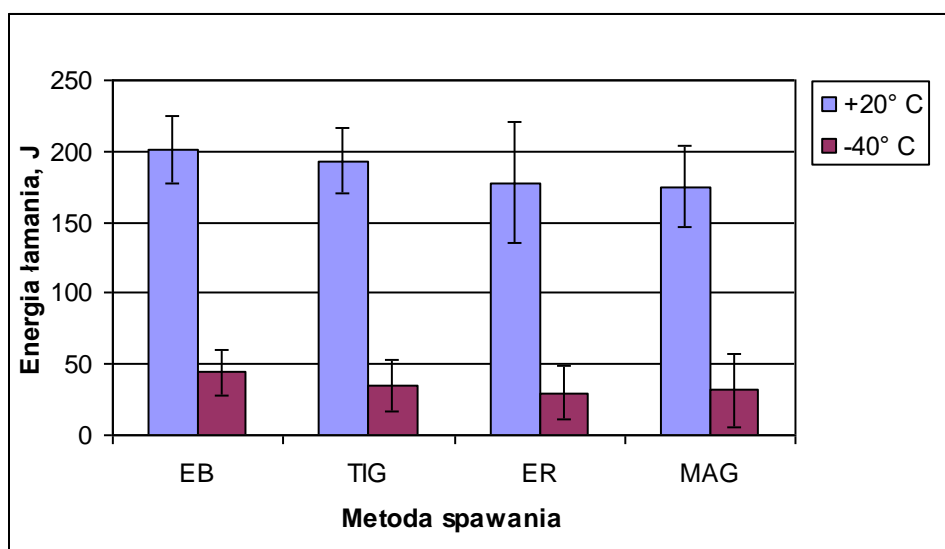


Rys. 52. Energia łamania stopiw wykonanych rutyłowymi elektrodami otulonymi

Zarówno w temperaturze dodatniej i ujemnej energia łamania wszystkich badanych stopiw była na podobnym poziomie i wynosiła ok. 170 J dla temp +20°C oraz ok. 35 J dla temp. -40°C.

Kolejnym badaniom udarności poddano stopiwa wykonane pozostałymi badanymi metodami z zastosowaniem standardowych materiałów dodatkowych. Gatunki użytych materiałów dodatkowych wraz z parametrami spawania powtórnie przedstawiono w tabelicy 5.

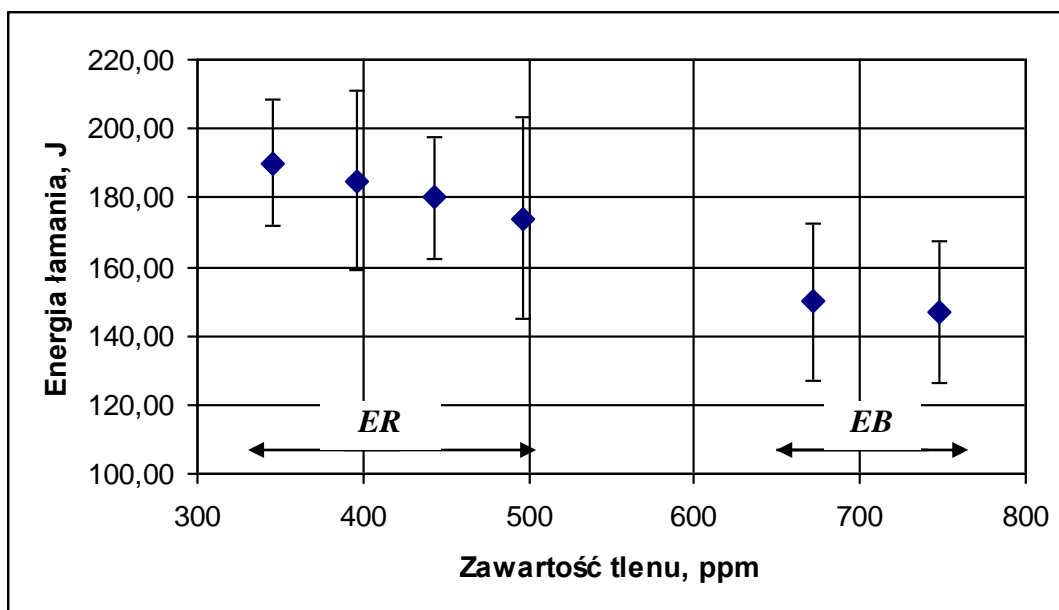
Przebadano po pięć próbek z każdej z badanych metod w dwóch temperaturach: -40°C oraz +20°C. Wyniki przeprowadzonych badań stopiw wykonanych z użyciem standardowych materiałów dodatkowych przedstawiono na rysunku 53. Wyniki stanowią średnią z pięciu prób.



Rys. 53. Energia łamania stopiw

Zarówno w temperaturze dodatniej jak i ujemnej wyższą energią łamania charakteryzowały się stopiwa wykonane z użyciem procesów niskotlenowych (*EB* oraz *TIG*). Przy czym spośród badanych metod niskotlenowych wyższą energią łamania wykazało się stopiwo wykonane otuloną elektrodą zasadową (*EB*). Aby potwierdzić zauważoną relację pomiędzy zawartością tlenu w stopiwie, a jego udarnością przebadano udarność stopiw wykonanych otulonymi elektrodami wykonanymi w warunkach laboratoryjnych. Stopiwa takie charakteryzowały się różną zawartością tlenu. Skład chemiczny oraz zawartość tlenu w stopiwach przedstawiono w tablicach 7 oraz 8.

Badania udarności stopiw wykonanych laboratoryjnymi elektrodami przeprowadzono w temperaturze +20°C. Wyniki tej próby przedstawiono na rysunku 54. Wyniki stanowią średnią z pięciu prób.



Rys. 54. Energia łamania stopiów o różnej zawartości tlenu

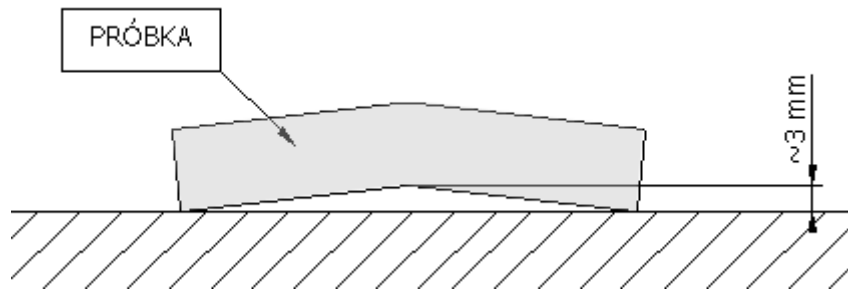
Uzyskane wyniki potwierdziły zauważoną wcześniej relację pomiędzy zawartością tlenu a udarnością stopiwa. Wraz ze wzrastającą zawartością tlenu w stopiwie obserwowano zmniejszającą się udarność tego stopiwa.

13.2. Udarność stopiów po odkształceniu wstępnym

Celem badań było określenie właściwości plastycznych złączy spawanych w ramach pojazdów ciężarowych, naprawianych po odkształceniach spowodowanych różnymi charakterami obciążeń.

Do badań wpływu odkształcenia na udarność stopiwa, przygotowano próbki o wymiarze próbek udarnościowych, lecz bez naciętych korbów. Próbki zostały podzielone na dwie grupy: I- do odkształcenia statycznego, II- dynamicznego.

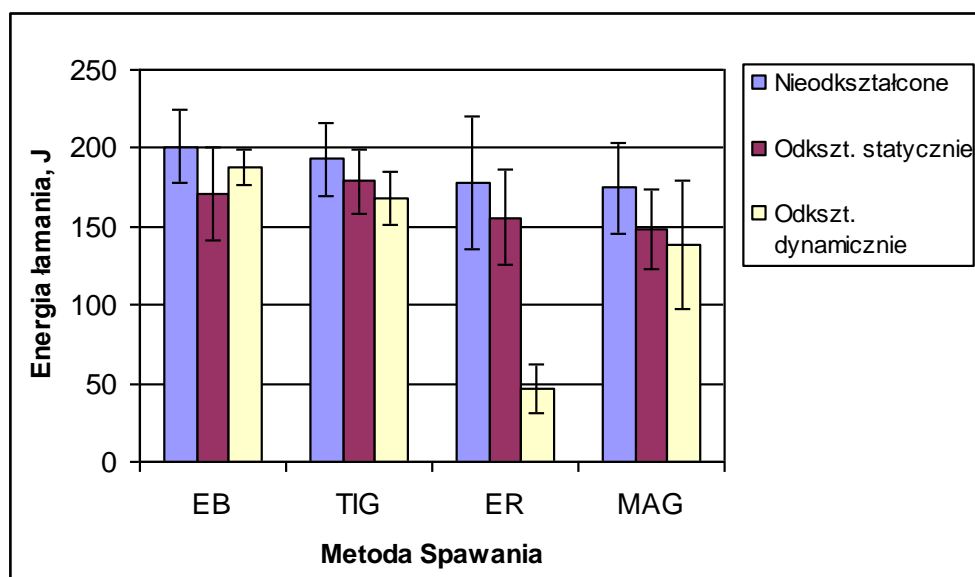
Odkształcenie obciążeniem statycznym było realizowane z użyciem prasy śrubowej. Obciążenie dynamiczne było realizowane z użyciem specjalnie wykonanego urządzenia. Na próbkę udarnościową spuszczano ciężarek o masie 9 kg z wysokości 0,4 m powodując odkształcenie próbki. Proces odkształcania próbek zarówno obciążanych statycznie jak i dynamicznie trwał do osiągnięcia strzałki ugięcia około 3 mm (30% grubości próbki udarnościowej). Sposób pomiaru odkształcenia próbek przedstawiono na rysunku 55.



Rys. 55. Sposób pomiaru odkształcenia próbek

Odształcone próbki zostały poddane statycznemu prostowaniu, realizowanemu na prasie śrubowej. Proces ten symulował naprawę złącza w ramie pojazdu. Na próbkach wykonano karb zgodnie z wytycznymi podanymi w normie PN-87/M-69772. Karb nacinano na stronie, która była rozciągana podczas obciążania wstępnego.

Energię łamania stopiw nieodkształconych, odkształconych statycznie oraz dynamicznie w temperaturze 20°C przedstawiono na rysunku 56. Wyniki stanowią średnią z pięciu prób.

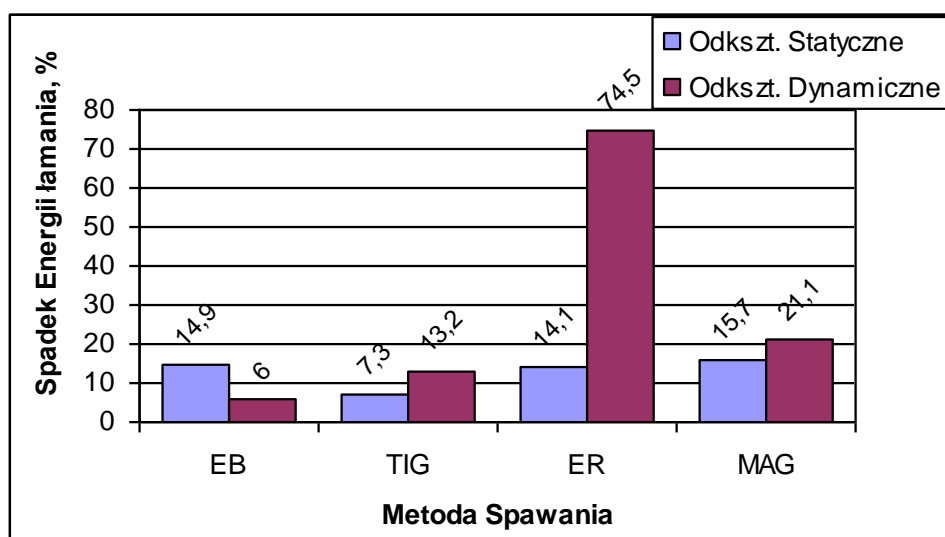


Rys. 56. Energia łamania stopiw nieodkształconych, odkształconych statycznie oraz dynamicznie temperatura próby 20°C

Próba udarności stopiw wstępnie odkształconych statycznie oraz dynamicznie w temperaturze -40°C wykazała, iż energia ich łamania w większości przypadków wynosiła poniżej 40 J.

Ocena zmiany udarności w temperaturze dodatniej stopiw po wstępnych odkształceniu byłaby bardziej przejrzysta gdyby wyniki przedstawione zostały w formie procentowego obniżenia energii łamania stopiw po odkształceniu danym rodzajem obciążenia w stosunku do energii

łamania stopiwa nieodkształconego. Ten sposób prezentacji wyników zamieszczono na rysunku 57.

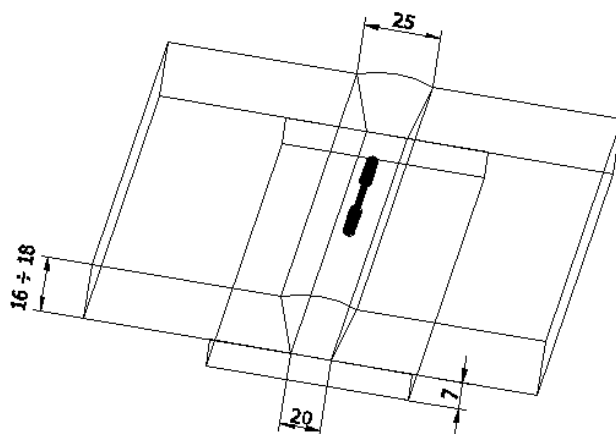


Rys. 57. Procentowy spadek energii łamania stopiw w stosunku do pracy łamania stopiwa nieodkształconego, temp. 20°C

Wykres przedstawiony na rys. 58 uwidoczniał, iż stopiwa wykonane metodami niskotlenowymi charakteryzowały się mniejszymi spadkami udarności po odkształceniu oraz naprawie polegającej na statycznym prostowaniu. Dało się również zauważyć, iż w większości przypadków większe spadki energii łamania występowały po odkształceniu obciążeniem dynamicznym. Największym obniżeniem energii łamania wykazało się stopiwo wykonane z użyciem procesu średniotlenowego - stopiwo wykonane rutyłową elektrodą otuloną. W tym przypadku spadek energii łamania w stosunku do energii łamania stopiwa nieodkształconego wyniósł ponad 74%.

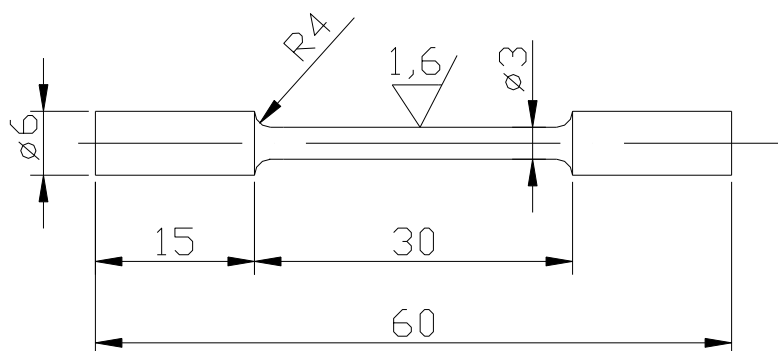
13.3. Wytrzymałość doraźna stopiw

Badane stopiwo przygotowano zgodnie z normą PN EN 87/M 69772. Sposób pobrania badanego stopiwa do wykonania próbek przedstawiono na rysunku 58.



Rys. 58. Sposób pobrania stopiwa do wykonania próbki wytrzymałościowej wynikający z normy PN EN 87/M 69772

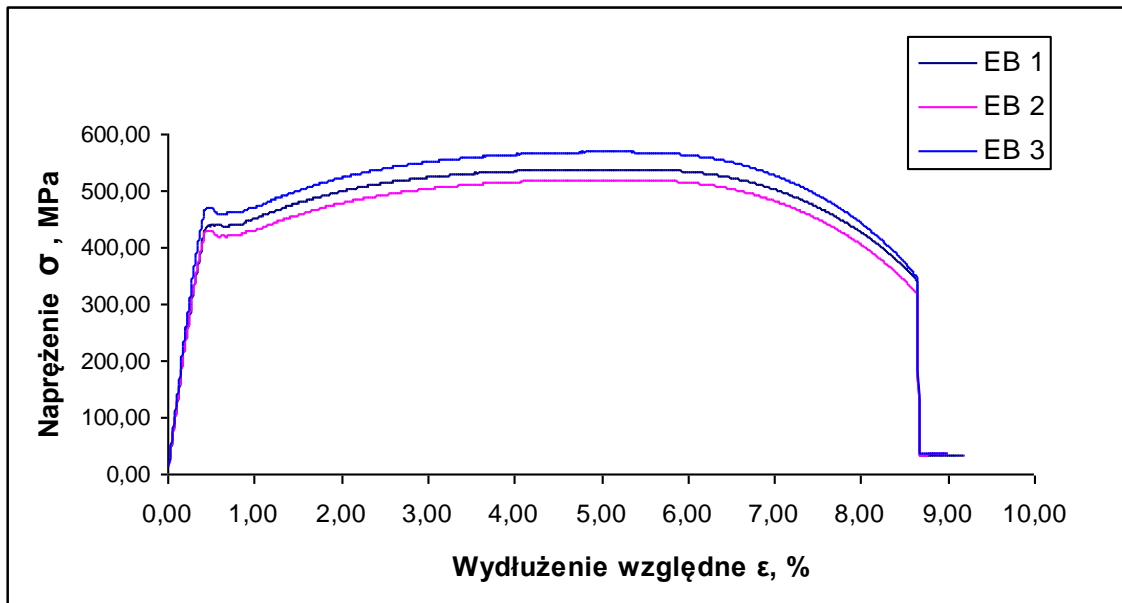
Próbki do badań zostały wykonane zgodnie z wytycznymi wynikającymi z normy EN 10002-1:1990. Wymiary próbek użytych do badań przedstawiono na rys. 59.



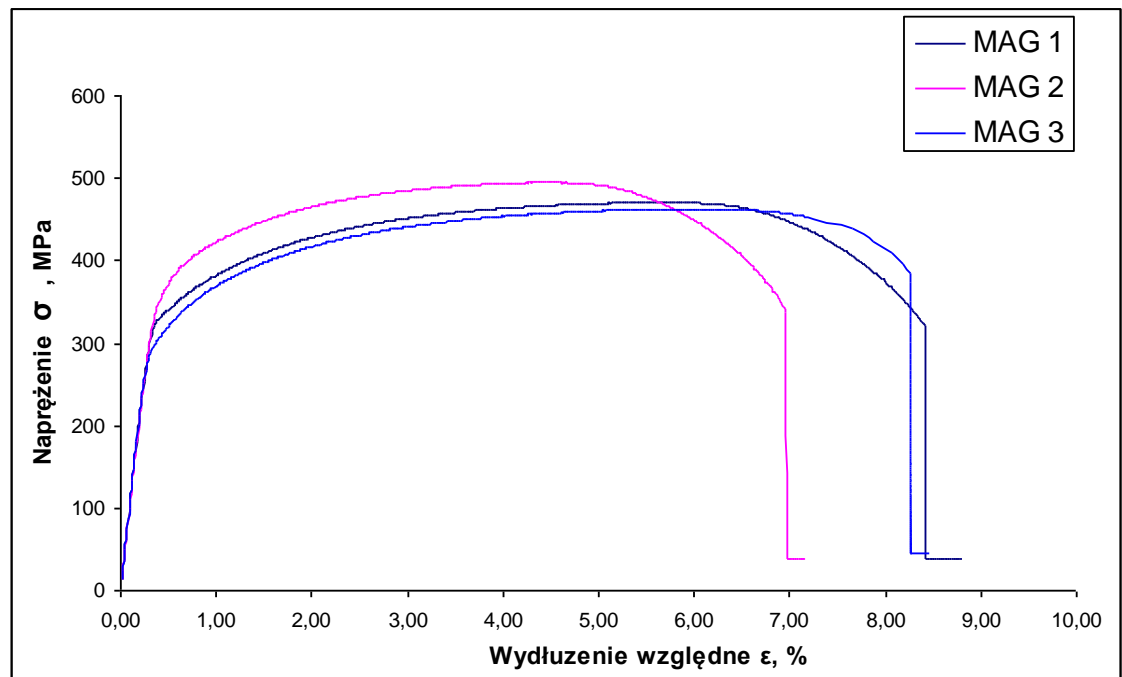
Rys. 59. Wymiary próbek używanych do badań zgodnie z norma EN 10002-1:1990

Badania wytrzymałościowe przeprowadzono na urządzeniu MTS Insight. Badania prowadzono powtarzając trzykrotnie pomiary dla każdej z badanych metod spawalniczych. Wszystkie próbki rozciągano z prędkością 0,5 mm/min.

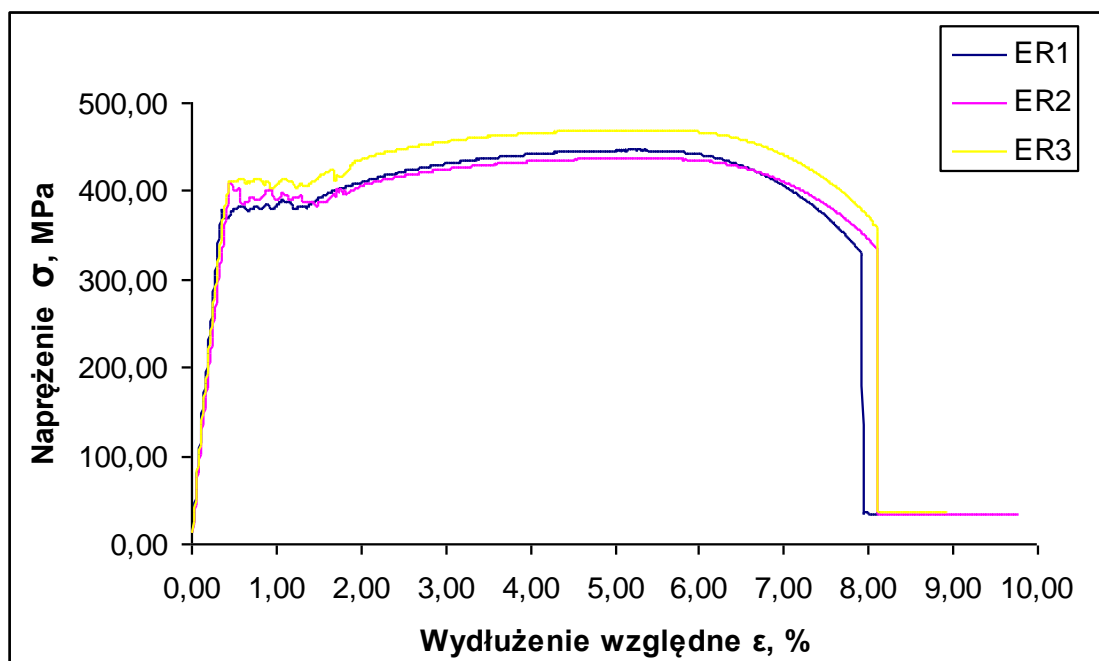
Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w formie wykresów obrazujących zależność naprężenie-wydłużenie względne. Otrzymane wykresy przedstawiono na rysunkach 60÷63.



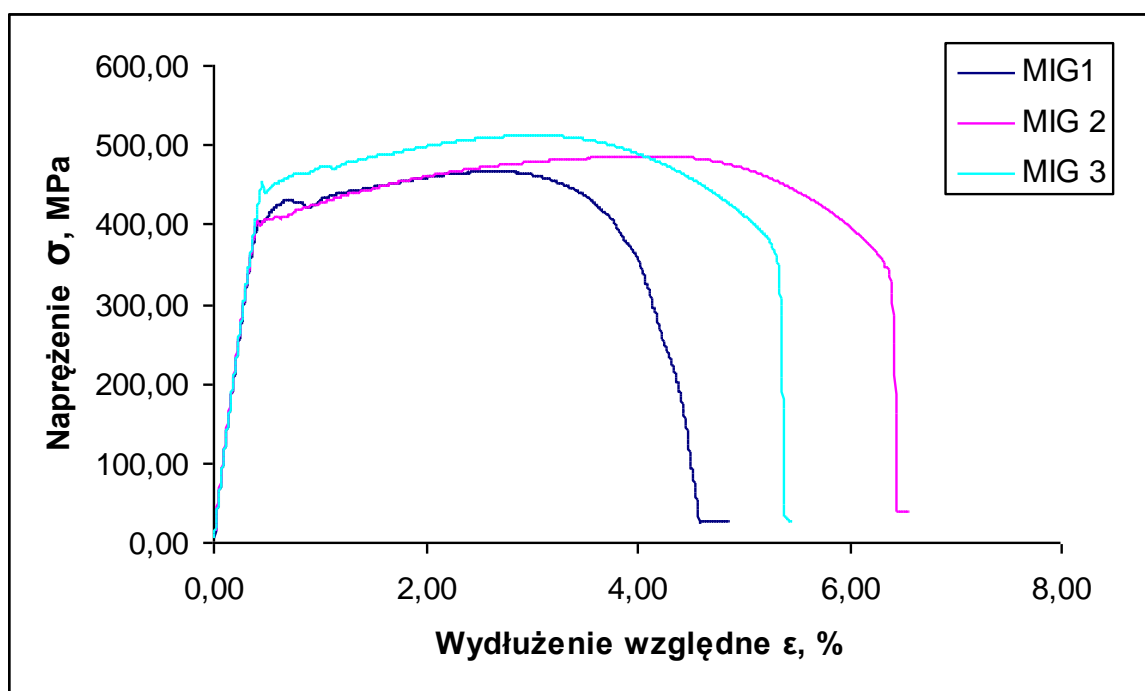
Rys. 60. Wykres rozciągania stopiwa wykonanego zasadowymi elektrodami otulonymi



Rys. 61. Wykres rozciągania stopiw wykonanych metodą MAG



Rys. 62. Wykres rozciągania stopiw wykonanych otuloną elektrodą rutyłową



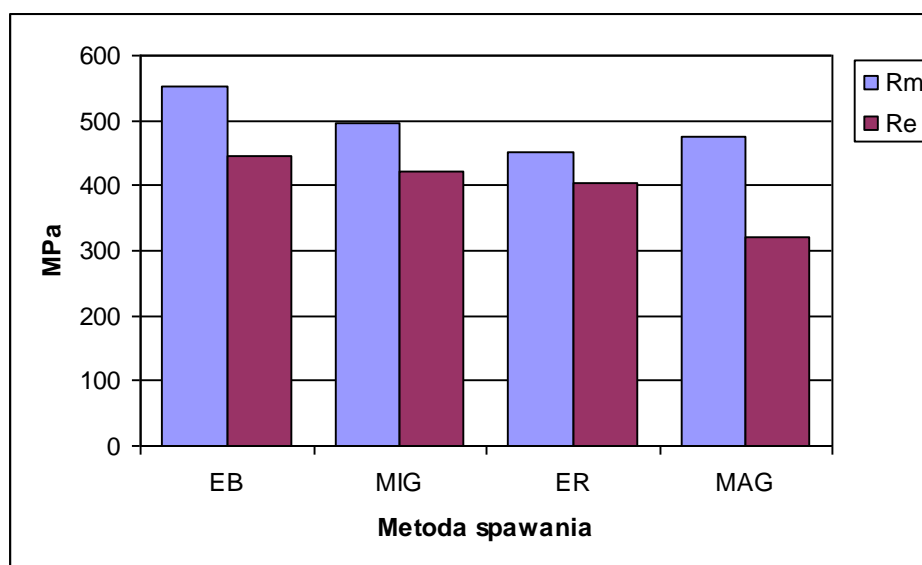
Rys. 63. Wykres rozciągania stopiwa wykonanego metodą MIG

Zestawienie wartości R_m oraz R_e dla badanych stopiw przedstawiono w tabelicy 14.

Wartości R_m oraz R_e dla badanych stopiw

Nr próbki	EB		MIG		ER		MAG	
	R_m , MPa	R_e , MPa	R_m , MPa	R_e , MPa	R_m , MPa	R_e , MPa	R_m , MPa	R_e , MPa
1	538,6	434,1	467,4	407,8	446,9	411,9	470,8	341,3
2	520,3	442,6	486,2	407,5	437,6	385,9	495,1	327,7
3	596,1	463,6	535,2	447	470	411,4	462,8	295,7

Z uzyskanych wyników badanych stopiw wyznaczono średnie wartości R_m oraz R_e . Wielkości te przedstawiono na rysunku 64.

Rys. 64. Wartości R_e oraz R_m badanych stopiw

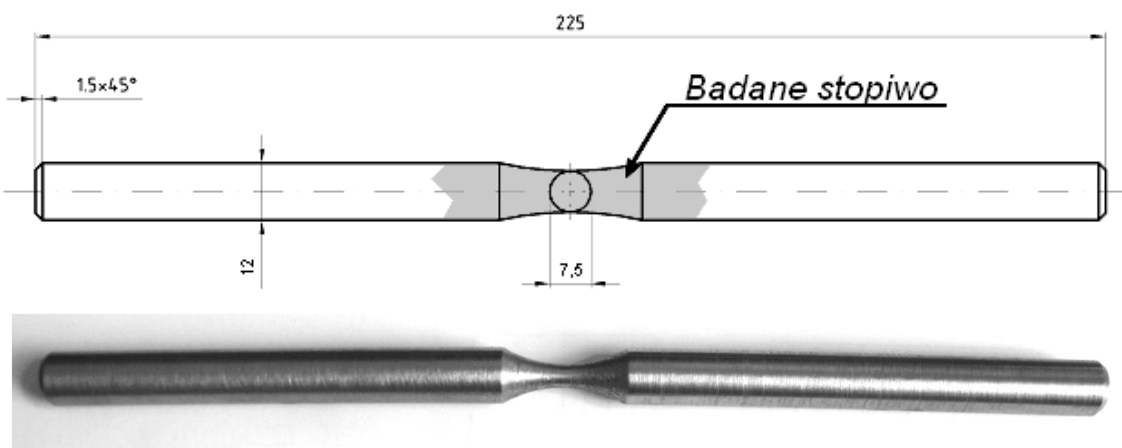
Stopiwa wykonane metodami nisko tlenowymi charakteryzowały się wyższymi wartościami R_e oraz R_m . Największa różnica w wartościach R_m występowała pomiędzy stopiwami wykonanymi otulonymi elektrodami zasadowymi (*proces niskotlenowy*) a stopiwem wykonanym otulonymi elektrodami rutyłowymi (*proces średniotlenowy*). Różnica ta wynosiła niespełna 10%. Różnica w energii łamania stopiw wykonanych tymi samymi metodami (*EB oraz ER*) wynosiła niespełna 13% na korzyść metody niskotlenowej. Zatem wytrzymałość doraźna w porównaniu z udarnością w mniejszym stopniu zależy od zawartości tlenu w stopiwie.

Wyniki badań wytrzymałościowych i udarności wskazały na fakt, iż lepszymi właściwościami plastycznymi oraz wytrzymałościowymi charakteryzowały się stopiwa wykonane metodami niskotlenowymi. Fakt taki, zatem musi być związany z różną zawartością drobnoziarnistego ferrytu AF, którego stopiwo elektrod zasadowych zawiera stosunkowo najwięcej.

Natomiast ilość drobnoziarnistego ferrytu AF jest związana z ilością tlenu w stopiwiu [127÷132].

13.4. Wytrzymałość zmęczeniowa badanych stopiw

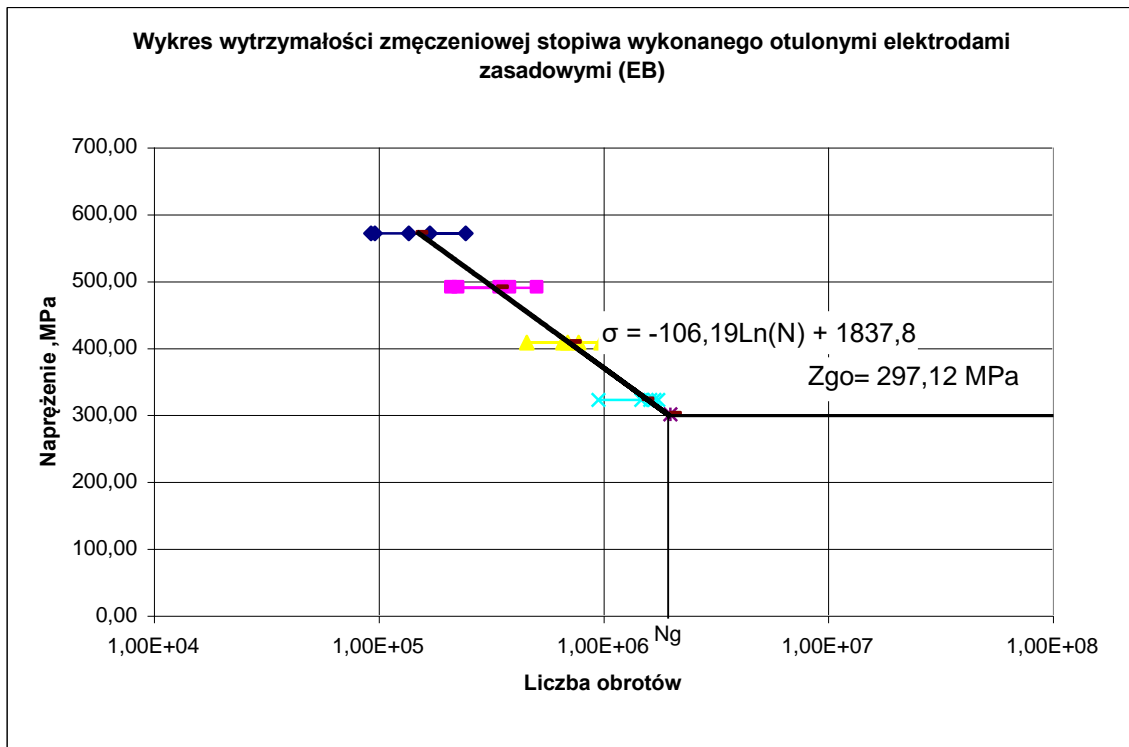
Badane stopiwa przygotowano zgodnie z normą PN EN 87/M 69772. Z przygotowanego stopiwa wytoczono próbki bez karbu, zgodnie z wytycznymi wynikającymi z normy PN EN 76/H 04326. Kształt oraz wymiary próbek przedstawiono na rys. 65.



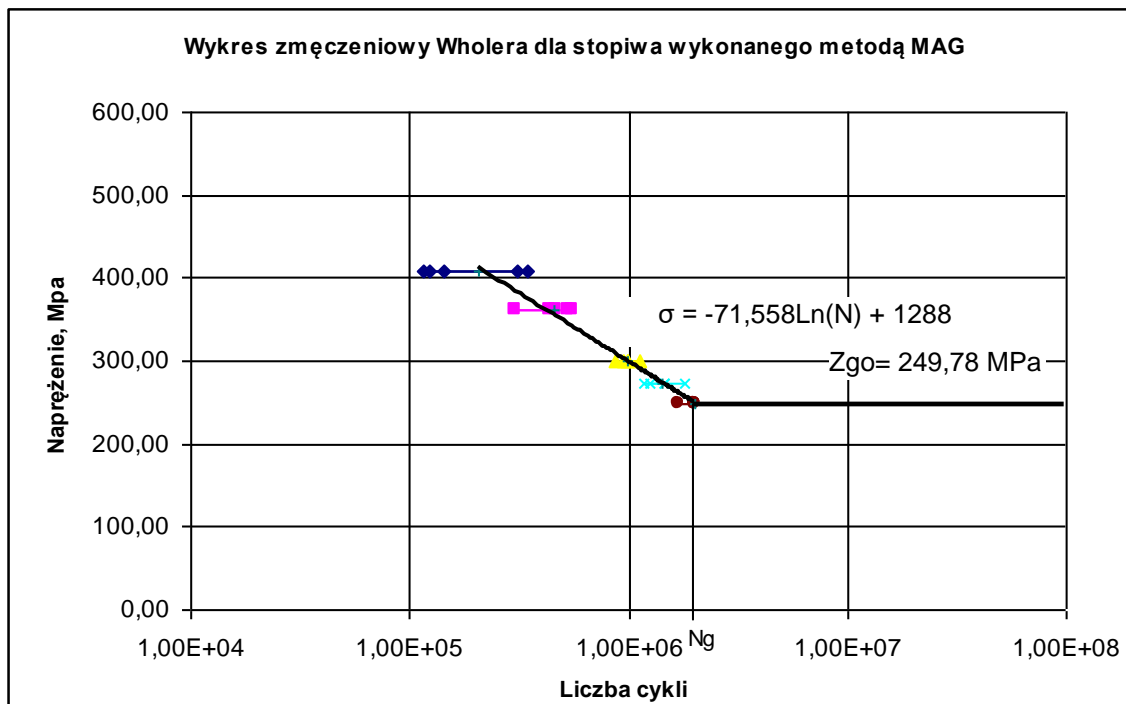
Rys. 65. Wymiary oraz kształt próbek używanych do badań zmęczeniowych

Badania zmęczeniowe prowadzono na urządzeniu do badania wytrzymałości zmęczeniowej dla zginania obrotowego: MUJ 6000. Jako podstawę zmęczenia dla połączeń spawanych przyjęto wartość $2 \cdot 10^6$ cykli [56]. Każdorazowo dla danego poziomu naprężenia badano pięć próbek. Po zwiększeniu naprężenia powyżej wytrzymałości zmęczeniowej przebadano dodatkowo cztery poziomy naprężenia dla każdej metody tak, aby otrzymać w przybliżeniu równomierny rozkład punktów.

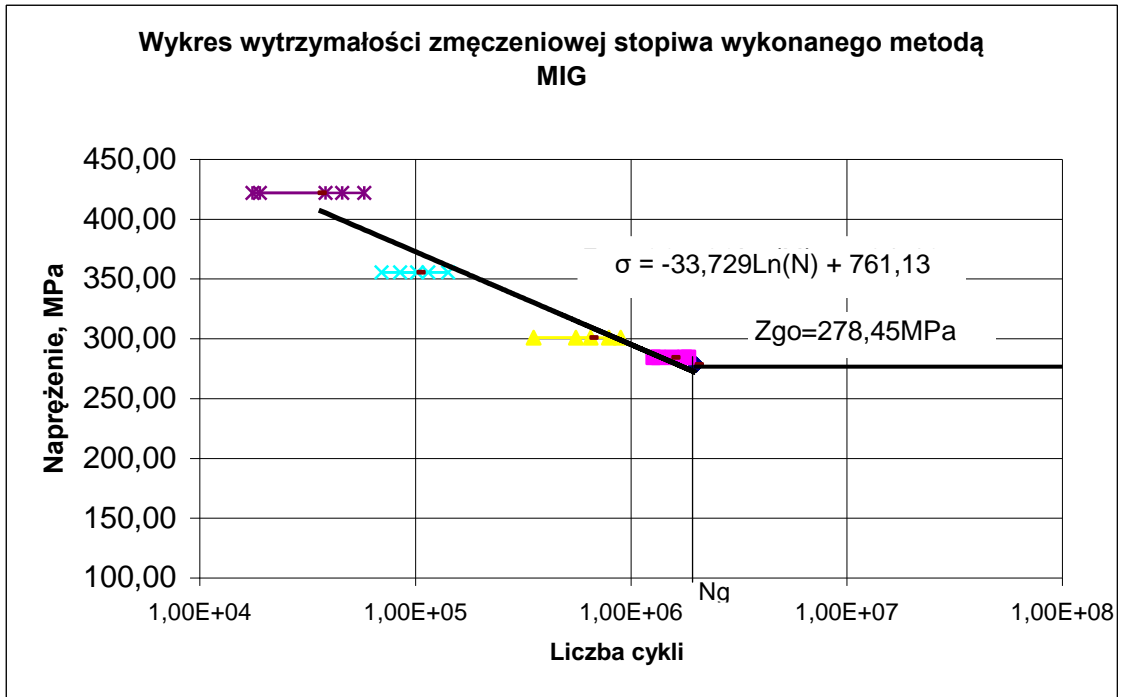
Po przeprowadzeniu badań danej serii próbek, wyniki obrobiono statystycznie, wyznaczając równanie prostej regresji oraz obliczając wartość wytrzymałości zmęczeniowej. Następnie sporządzono wykresy wytrzymałości zmęczeniowej Wöhlera. Wykresy przedstawiono na rysunkach 66÷69.



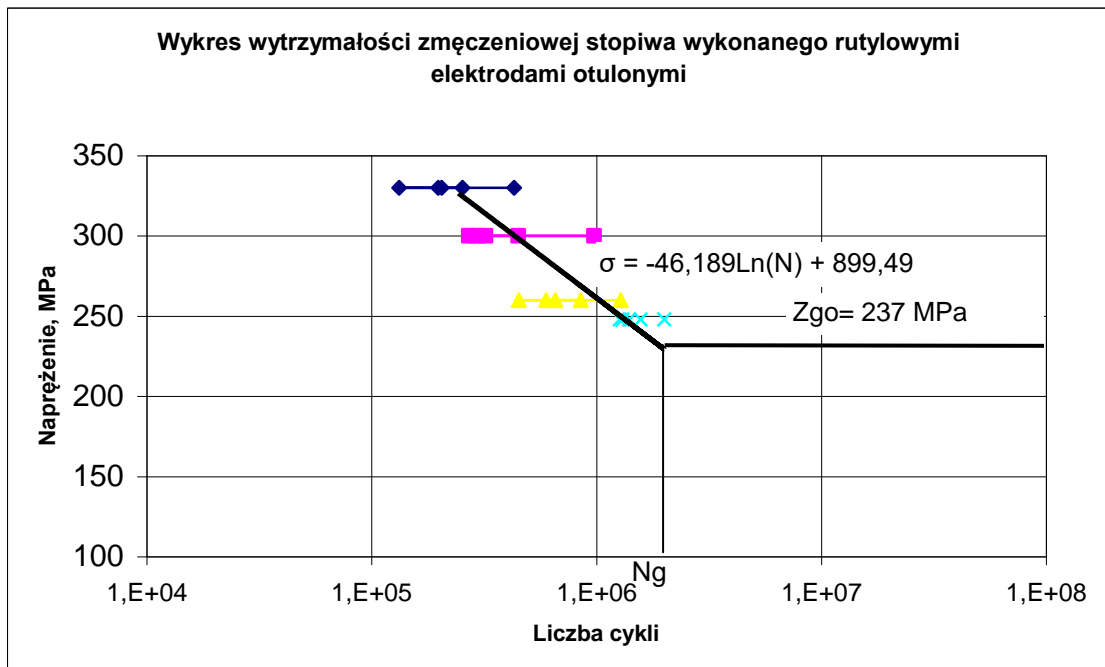
Rys. 66. Wykres wytrzymałości zmęczeniowej Wöhlera dla stopiwa wykonanego elektrodami zasadowymi



Rys. 67. Wykres wytrzymałości zmęczeniowej Wöhlera dla stopiwa wykonanego metodą MAG

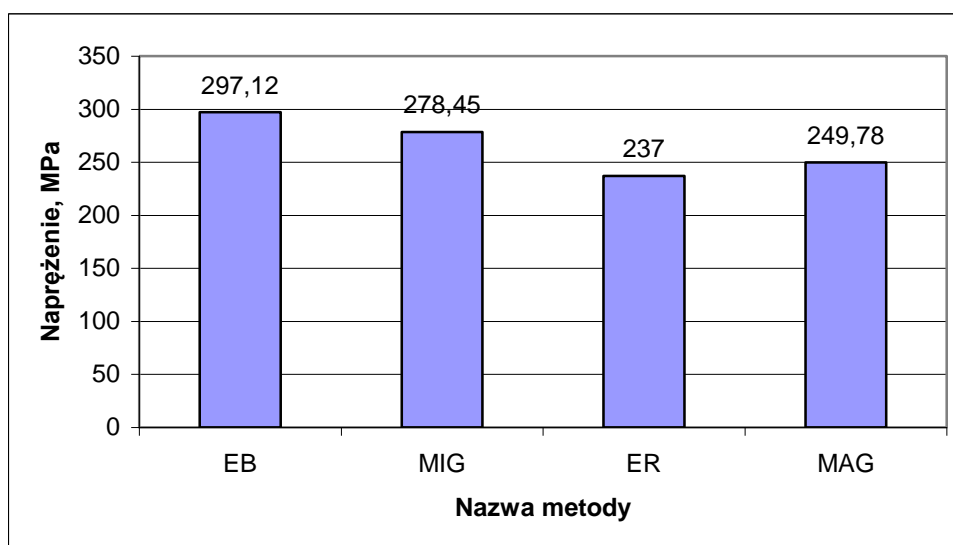


Rys. 68. Wykres wytrzymałości zmęczeniowej Wöhlera dla stopiwa wykonanego metodą MIG



Rys. 69. Wykres wytrzymałości zmęczeniowej Wöhlera dla stopiwa wykonanego elektrodami rutyłowymi

Zestawienie wartości wytrzymałości zmęczeniowej dla badanych metod spawalniczych przedstawiono na rysunku 70.



Rys. 70. Wytrzymałość zmęczeniowa stopiw wykonanych badanymi metodami

Z przeprowadzonych badań wynikało, iż poza lepszą udarnością oraz wytrzymałością doraźną na rozciąganie, stopiwa wykonane metodami niskotlenowymi charakteryzowały się również wyższymi wartościami wytrzymałości zmęczeniowej. Różnice w wynikach nie były tak duże jak zarejestrowano to dla próby udarności stopiw (13%), w badaniach zmęczeniowych pomiędzy najbardziej różniącymi się wynikami istniała różnica 9%.

13.5. Pomiar naprężeń eksploatacyjnych w spawanej ramie pojazdu ciężarowego

Uzyskane do tej pory wyniki badań o charakterze eksploatacyjnym bezsprzecznie wskazują na wyższość własności plastycznych oraz wytrzymałościowych stopiw wykonanych metodami niskotlenowymi nad stopiwami metodami średniotlenowymi. Brak jednak było informacji o stopniu przydatności spawalniczych metod niskotlenowych w naprawach, przebudowach oraz procesach przystosowania ram pojazdów ciężarowych. W celu stwierdzenia czy własności stopiw metod niskotlenowych są niejako wystarczające dla zapewnienia bezpiecznej eksploatacji ram spawanych pojazdów ciężarowych konieczne było zestawienie wyników badań z wartościami naprężeń eksploatacyjnych w ramach nośnych pojazdów.

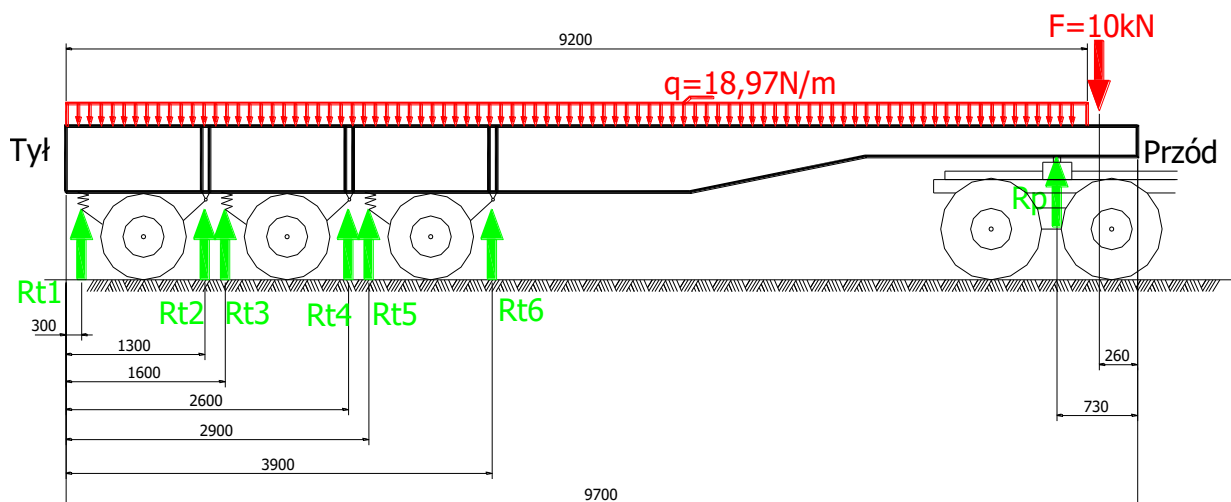
Kolejnym punktem badań było, określenie wartości naprężeń w spawanej konstrukcji ramy nośnej pojazdu ciężarowego. W celu pełnej realizacji tego punktu badań przeanalizowano metodami analitycznymi wartości momentów gnących w podłużnych ramach nośnej pojazdu

ciężarowego, przeprowadzono analizy numeryczne z wykorzystaniem programu MES oraz przeprowadzono pomiar metodą tensometryczną na obiekcie rzeczywistym.

13.5.1. Analityczna analiza momentów gnących i naprężeń w podłużnicach ramy naczepy samowyładowczej

Przeanalizowano konstrukcję ramy nośnej naczepy samowyładowczej BODEX KIS 3W-S. Analiza miała wskazać miejsca w ramie naczepy, które charakteryzują się występowaniem największych naprężeń. Analizę rozpoczęto od bardzo dokładnego pomiaru geometrii rzeczywistej ramy nośnej naczepy samowyładowczej marki BODEX.

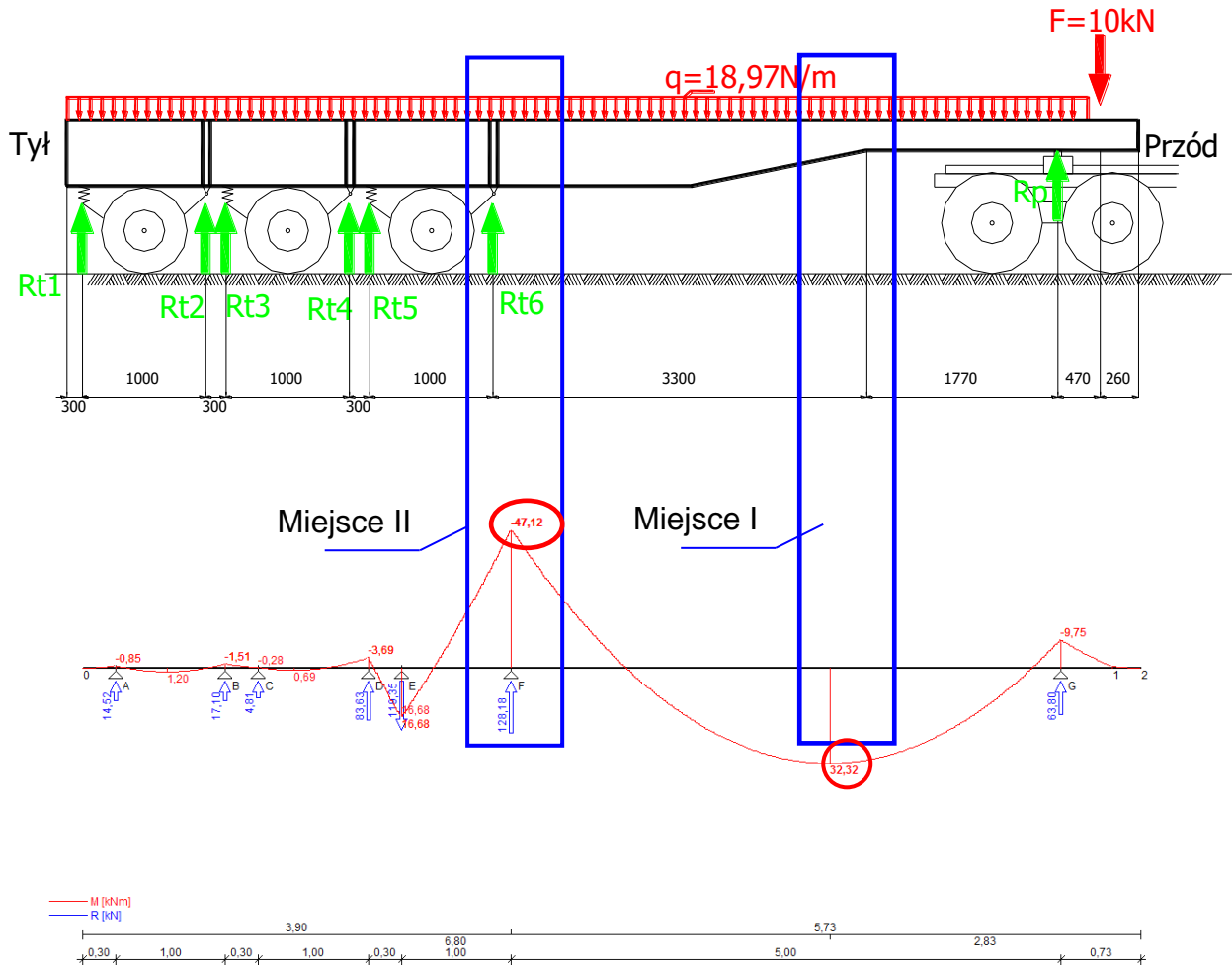
Badania związane z pomiarem wartości naprężeń eksploatacyjnych rozpoczęto od analitycznego wyznaczenia miejsc w podłużnicach, w których występują duże momenty gnące. Analizę przeprowadzono zakładając występowanie w skrzyni ładunkowej 15000 kg obciążenia, uwzględniono również masę samej skrzyni ładunkowej 3400 kg. W obliczeniach przyjęto, iż podłużnica na długości występowania skrzyni ładunkowej obciążona jest obciążeniem ciągłym o wartości $q = 18,97 \text{ N/m}$ (uwzględniającym masę ładunku i masę skrzyni ładunkowej). Uwzględniono występowanie siły skupionej pochodzącej od masy siłownika hydraulicznego znajdującego się w przedniej części naczepy. Przyjęto iż podparcie analizowanej podłużnicy występowało w siedmiu punktach (reakcje $R_p, R_{t1} \div R_{t6}$) rysunek 71.



Rys. 71. Siły i reakcje występujące w rozpatrywanym przypadku obciążenia ramy nośnej

W obliczeniach podłużnica ramy potraktowana została jak typowa belka, na którą działają obciążenie ciągłe oraz siła skupiona. Obliczenia rozpoczęto od wyznaczenia reakcji podporowych ($R_p, R_{t1} \div R_{t6}$), następnie stosując analityczny sposób wyznaczania momentów gnących

w belkach przeanalizowano całą długość podłużnicy. Uzyskane wyniki potwierdzono wykonując obliczenia w programie „Belka” biura inżynierskiego „Specbud”. Wyniki przeprowadzonych obliczeń przedstawiono na rysunku 72.



Rys. 72. Momenty gnące w podłużnicy ramy nośnej naczepy samowyladowczej

Z przeprowadzonych obliczeń wynikało, że moment gnący największą wartość osiąga w odległości około 3,9m od tylnej strony podłużnicy (*miejsce występowania reakcji Rt6*). Maksymalna wartość momentu gnącego wynosiła $-47,17 \text{ kNm}$. Zauważyć należało, iż w miejscu gdzie moment gnący osiągał swoje maksimum podłużnica posiadała wysokość 420 mm. Była to wysokość większa od tej jaka występowała w przedniej części podłużnicy 240 mm. Zatem maksymalna wartość momentu gnącego w miejscu o stosunkowo dużej wysokości mogła nie generować maksymalnych naprężeń. Z tego względu w dalszych obliczeniach naprężeń wzięto też pod uwagę miejsce występowania maksymalnego momentu w części podłużnicy charakteryzującej się mniejszą wysokością. Maksymalny moment gnący w części podłużnicy o

mniejszej wysokości występował w odległości 2,5 m od przedniej strony. Wartość momentu w tym miejscu wynosiła 32,32 MPa.

Przeanalizowano wartości naprężeń w miejscach występowania największych momentów gnących (w częściach podłużnicy o mniejszej oraz większej wysokości).

Tablica 15

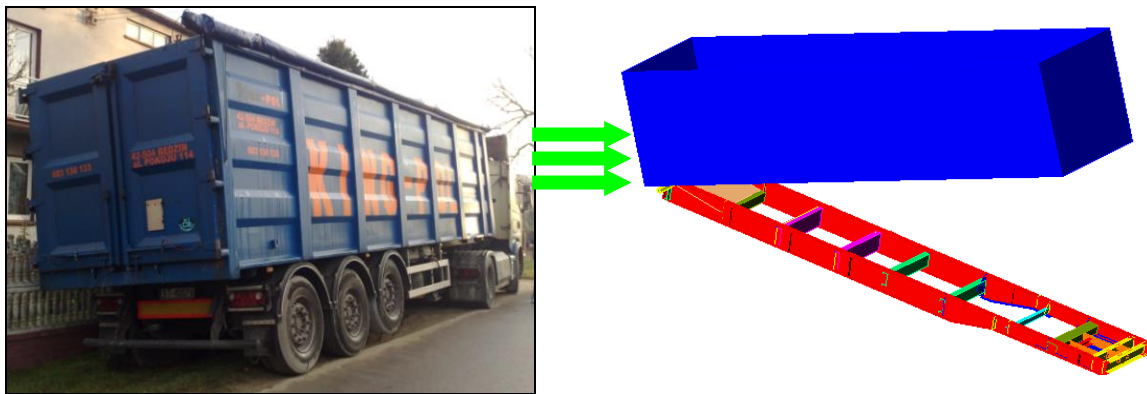
Obliczenia wartości naprężeń w podłużnicy

	3,9 m od tylnej strony podłużnicy -miejsce I	2,5 m od przedniej strony podłużnicy -miejsce II
Przekrój podłużnicy		
Wskaźnik wytrzymałości na zginanie: $W_x = \frac{BH^3 - bh^3}{6H}$	$W_x = \frac{150 \cdot 220^3 - 140 \cdot 200^3}{6 \cdot 220} =$ $3615000 \text{ mm}^3 = 0,0003615 \text{ m}^3$	$W_x = \frac{150 \cdot 420^3 - 140 \cdot 400^3}{6 \cdot 420} =$ $854444,4 \text{ mm}^3 = 0,000854 \text{ m}^3$
Naprężenia: $\sigma_x = \frac{M_{gx}}{2W_x}$	$\sigma_x = \frac{32320 \text{ Nm}}{2 \cdot 0,0003615 \text{ m}^3} = \underline{44,7 \text{ MPa}}$	$\sigma_x = \frac{47170 \text{ Nm}}{2 \cdot 0,000854 \text{ m}^3} = \underline{27,6 \text{ MPa}}$

Jak wynikało z przeprowadzonych obliczeń miejscem charakteryzującym się występowaniem maksymalnych naprężeń w podłużnicach było miejsce oddalone od przedniej części ramy naczepy o około 2,5m . W miejscu tym (w założonych warunkach) występowały naprężenia o wartości 44,7 MPa.

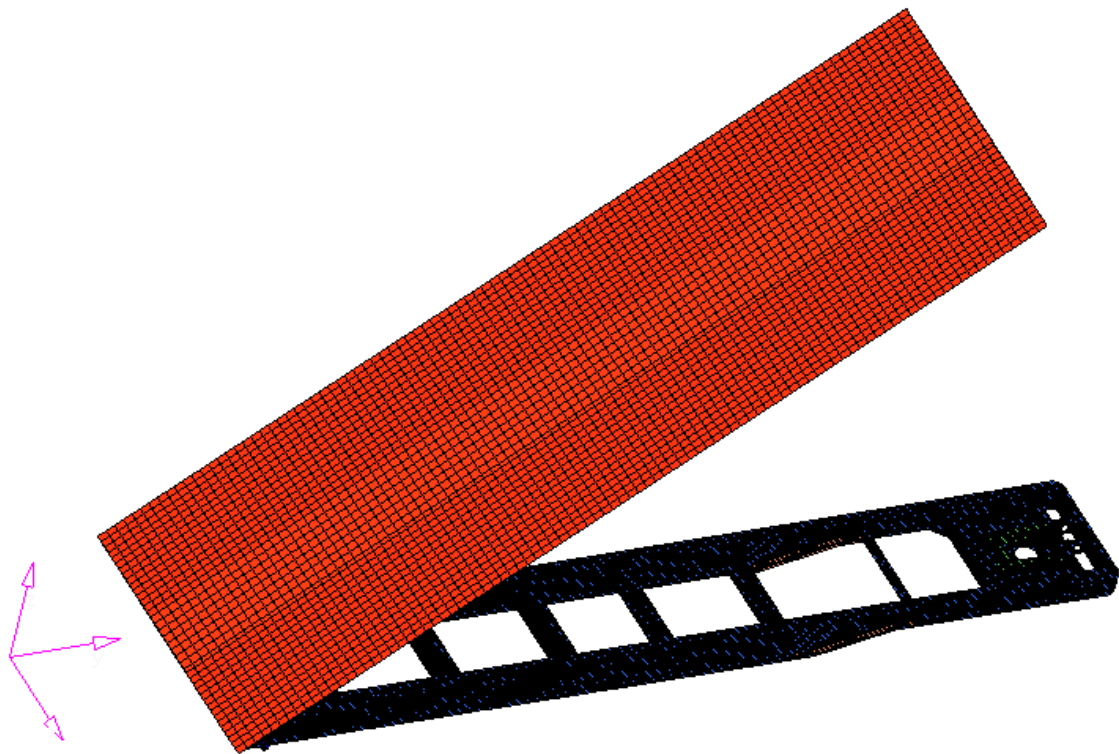
13.5.2. Analizy MES

Kolejnym etapem badań związanych z wartościami naprężeń w spawanej ramie nośnej pojazdu ciężarowego jest analiza numeryczna z wykorzystaniem programu MES- MSC. NASTRAN. Badania rozpoczęto od wykonania powłokowego modelu geometrycznego w programie SolidEdge. Model uwzględniał wymiary rzeczywistej ramy nośnej naczepy BODEX. Analizowaną naczepę oraz jej geometryczny model przedstawiono na rys. 73.

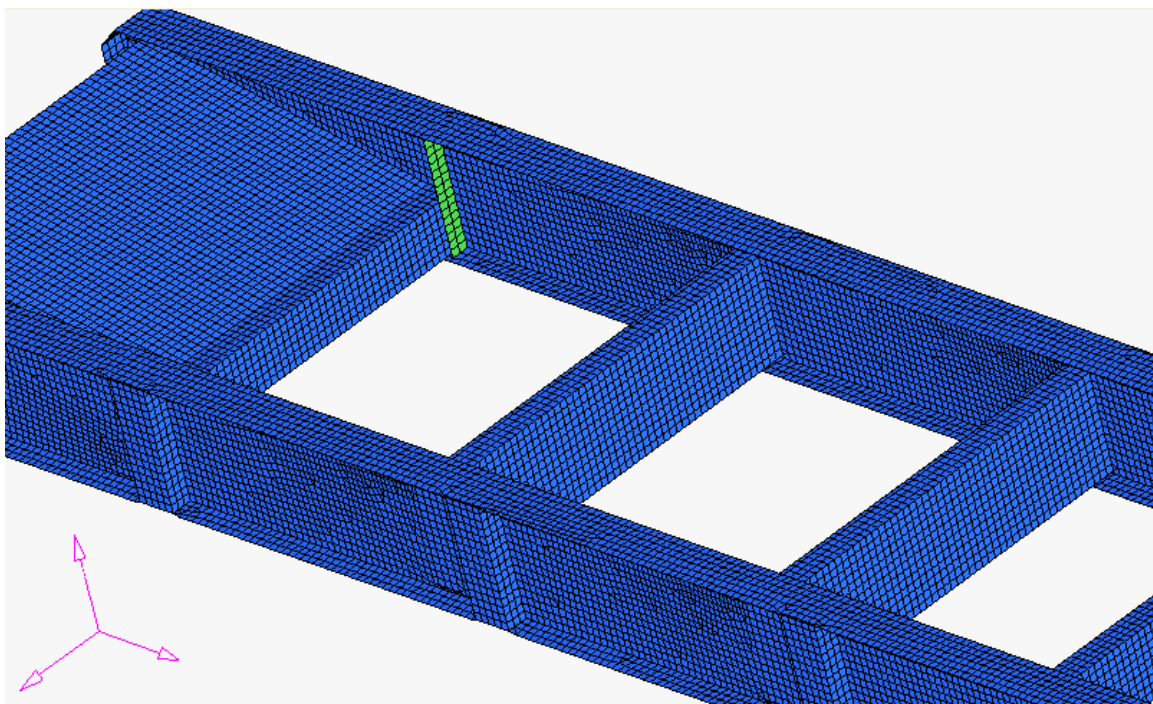


Rys. 73. Naczepa samowyładowcza BODEX oraz jej model geometryczny

W preprocesorze HyperMesch przeprowadzono dyskretyzację, dzieląc powłoki modelu na elementy skończone typu CTRIA3, CQUAD4, RBE2, CBAR z biblioteki programu MSC. NASTRAN. Obciążenia wynikające z ciężaru skrzyni ładunkowej, ładunku w niej znajdującego się, jak również z faktu występowania w przedniej części naczepy siłownika hydraulicznego unoszącego przednią część skrzyni ładunkowej w celu rozładunku symulowano siłami skupionymi oraz w postaci obciążenia ciągłego. Model „podparto” w miejscach mocowania osi kół jezdnych do ramy nośnej naczepy jak również w miejscu sprzęgu naczepy z ciągnikiem siodłowym. Podparcie to polegało za zablokowaniu ruchu w kierunku pionowym (oś Y) o zwrocie wartości ujemnych. W prowadzonych obliczeniach założono własności materiałowe stali S355J2G3 (tablica 3), z jakiej wykonywane są ramy pojazdów ciężarowych. Tak przygotowany model dyskretny przedstawiono na rys. 74 oraz 75.



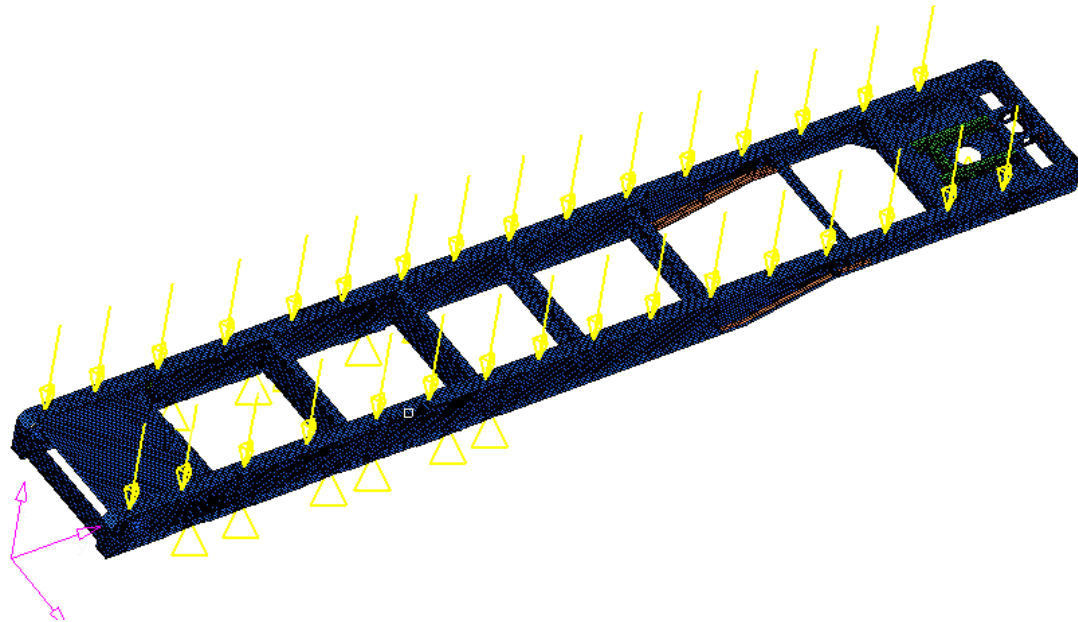
Rys. 74. Model dyskretny naczepy samowyładowczej marki BODEX



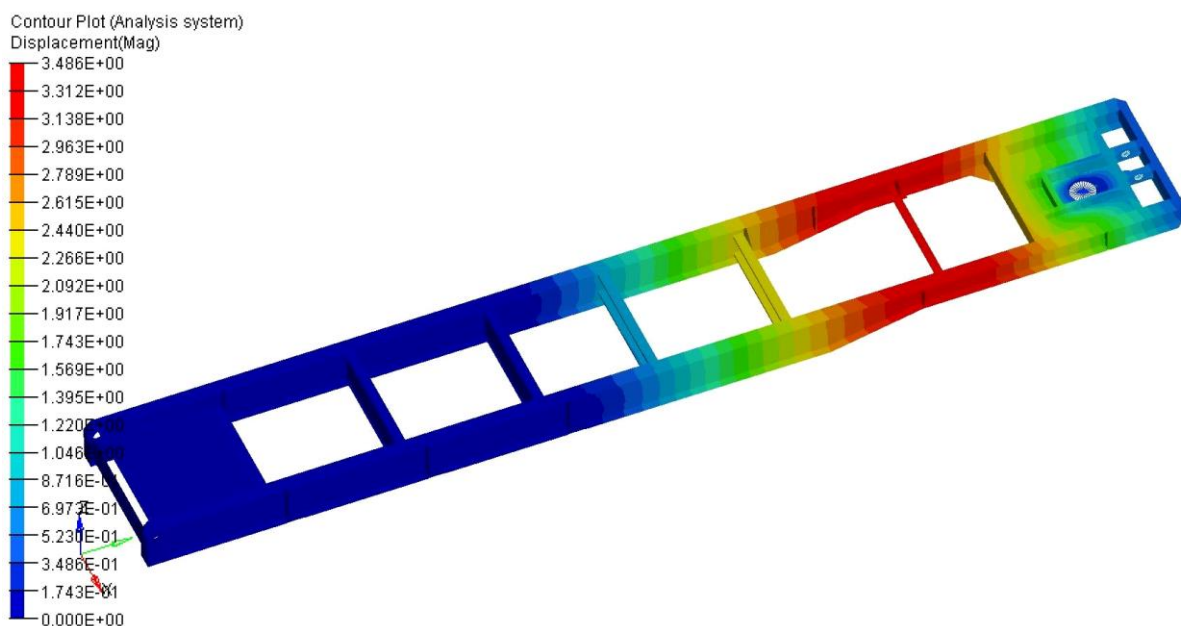
Rys. 75. Siatka modelu dyskretnego tylnej części ramy naczepy samowyładowczej

Przeanalizowano rozkład naprężeń w ramie naczepy w warunkach jej postoju na równej powierzchni, uwzględniając występowanie ładunku 15000 kg znajdującego się w osi symetrii naczepy oraz w odległości 4400 mm od tylnej krawędzi skrzyni ładunkowej (co w *przybliże-*

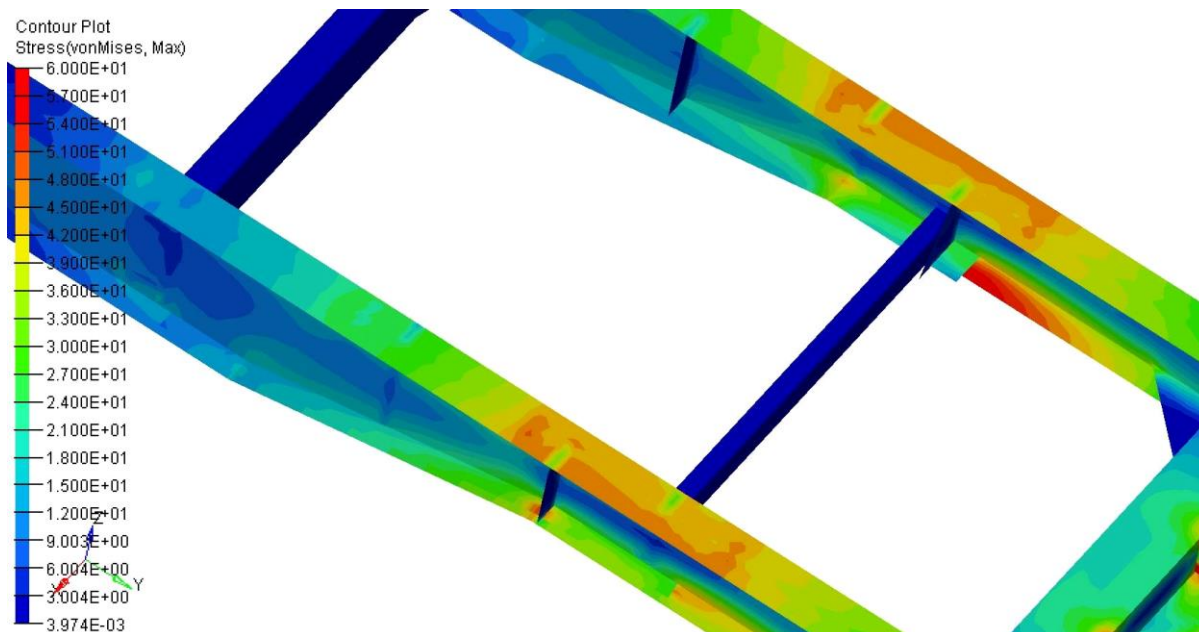
niu stanowiło połowę jej długości). W takich warunkach ciężar skrzyni i ładunku przenoszone były na całą powierzchnię górnych półek podłużnic. Schemat przyjętego obciążenia przedstawiono na rysunku 76.



Rys. 76. Schemat obciążenia ramy nośnej naczepy dla pierwszego analizowanego przypadku. Wyniki tak przeprowadzonej analizy przedstawiono na rysunkach 77 i 78 przedstawiających odkształcenie ramy naczepy oraz warstwicę jej naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego.



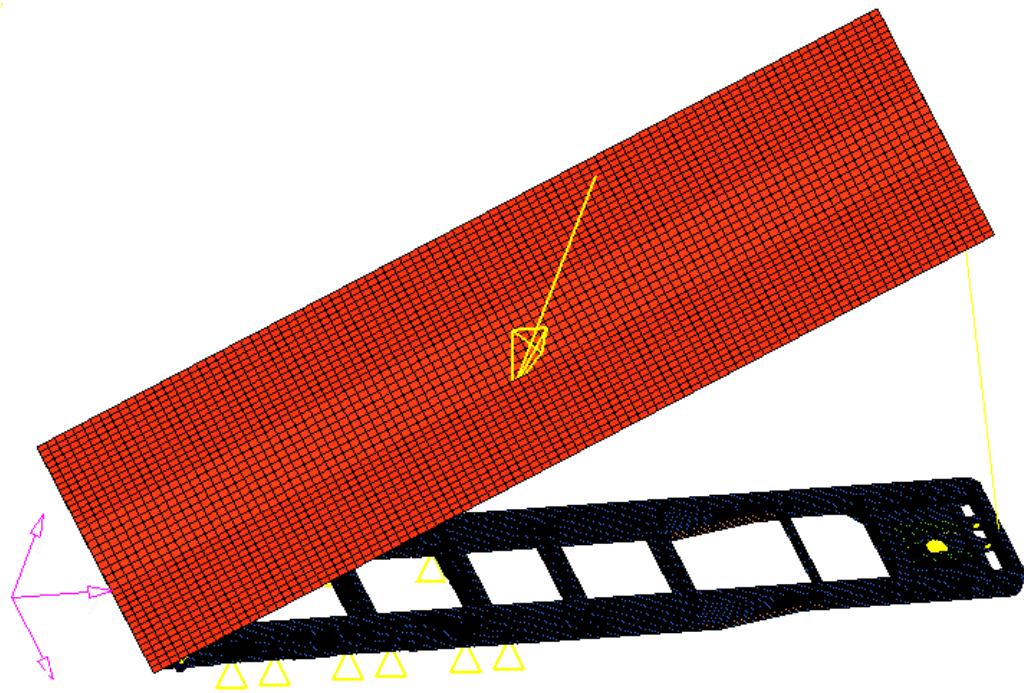
Rys. 77. Wielkości przemieszczeń poszczególnych części ramy nośnej naczepy BODEX w warunkach jej postoju na płaskiej powierzchni



Rys. 78. Warstwyce naprężeń zredukowanych ramy nośnej naczepy BODEX w miejscu gdzie osiągały one największą wartość

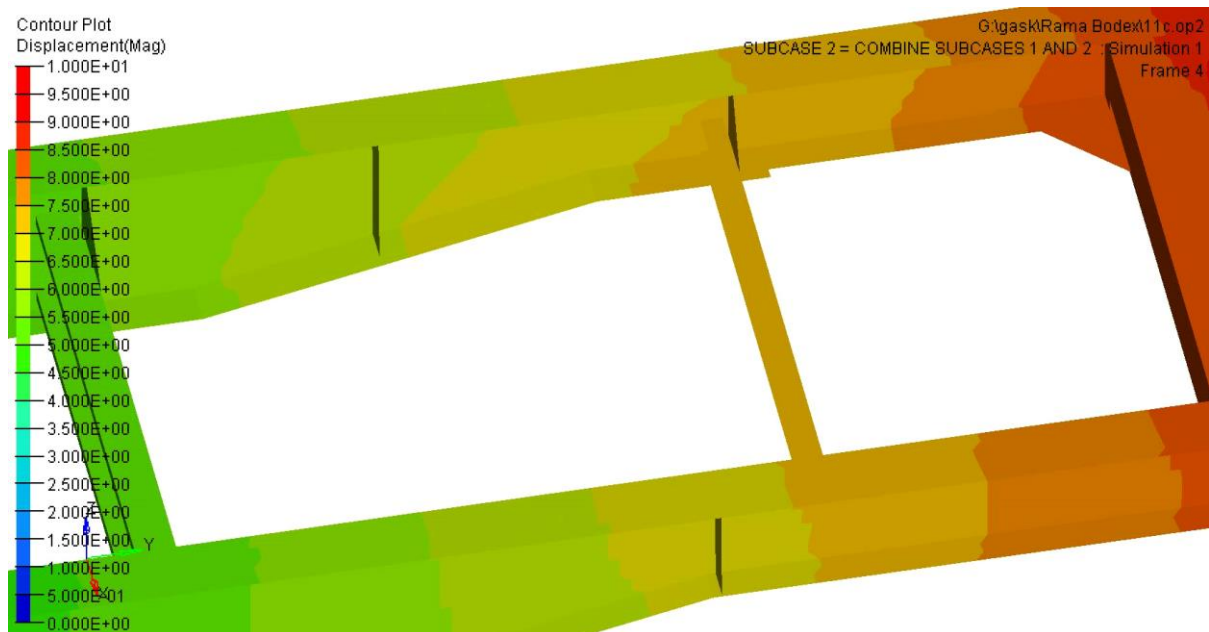
Zgodnie z przeprowadzoną symulacją- w miejscu zmiany wysokości podłużnic stwierdzono występowanie naprężeń o wartości 20÷30 MPa.

Kolejną przeprowadzoną symulacją była symulacja, która miała uwidocznić wielkości odkształceń oraz naprężeń podczas rozładunku naczepy. Przyjęto do symulacji, iż przednia część skrzyni ładunkowej naczepy będzie podniesiona na wysokość około 3m co stanowiło w przybliżeniu połowę maksymalnej wysokości na jaką unoszona jest przednia część skrzyni podczas rozładunku naczepy. Przyjęto również iż w takich warunkach nie następuje jeszcze zsuwanie się ładunku 15000 kg zlokalizowanego w osi symetrii naczepy oraz w odległości 4400 mm od tylnej krawędzi skrzyni ładunkowej. W tym przypadku siły pochodzące od ciężaru skrzyni ładunkowej przenoszone były na ramę nośną naczepy w trzech punktach. Punktami tymi były zawiasy, wokół których następował ruch obrotowy skrzyni ładunkowej względem ramy nośnej oraz miejsce mocowania podnośnika hydraulicznego wywołującego ruch przedniej części skrzyni ładunkowej w górę. Schemat przyjętego obciążenia przedstawiono na rysunku 79.

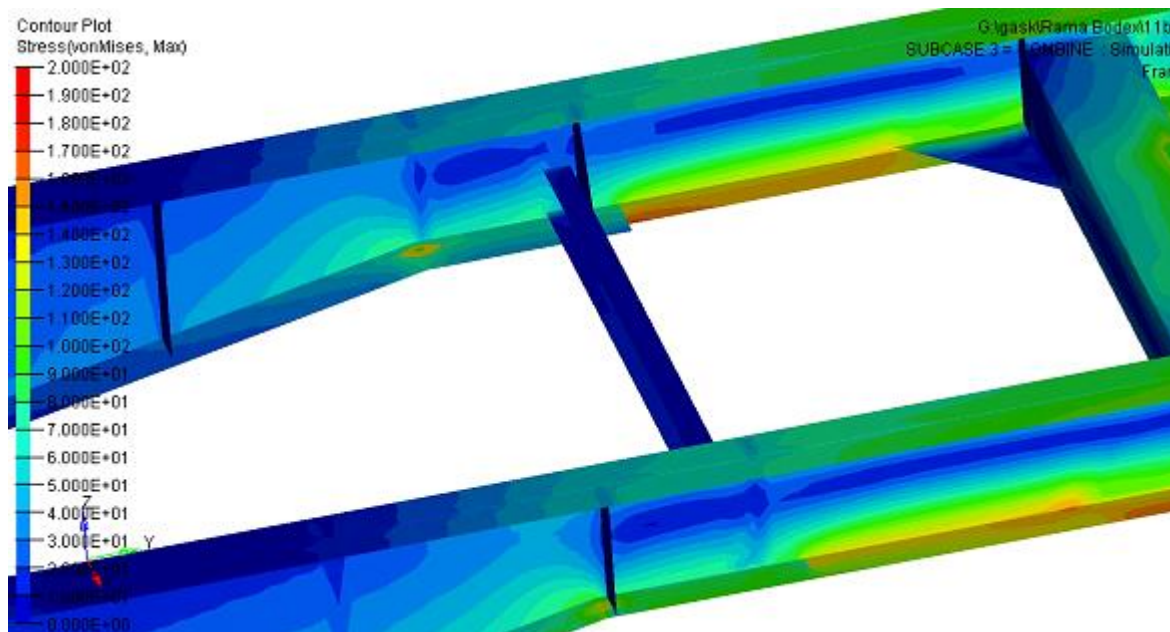


Rys. 79. Schemat obciążenia ramy nośnej naczepy dla drugiego analizowanego przypadku

Wyniki tak przeprowadzonej analizy przedstawiono na rysunkach przedstawiających odkształcenie ramy naczepy oraz warstwy jej naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera-Misses-Hencky'ego (rys. 80 oraz 81).



Rys. 80. Wielkości przemieszczeń poszczególnych części ramy nośnej naczepy BODEX w warunkach jej rozładunku



Rys. 81. Warstwice naprężeń zredukowanych ramy nośnej naczepy BODEX w miejscu gdzie osiągały one największą wartość w warunkach jej rozładunku

Również w tym przypadku największe naprężenia występowały w podobnie zlokalizowanym miejscu, było to ponadto to samo miejsce, które wyznaczone zostało w poprzedniej analizie. Najbardziej obciążonym miejscem podczas rozładunku naczepy samowyladowczej było miejscem gdzie zmieniała się wysokość podłużnic. Analiza wykazała, iż w miejscu tym podczas rozładunku występowały naprężenia o wielkości rzędu 170 MPa.

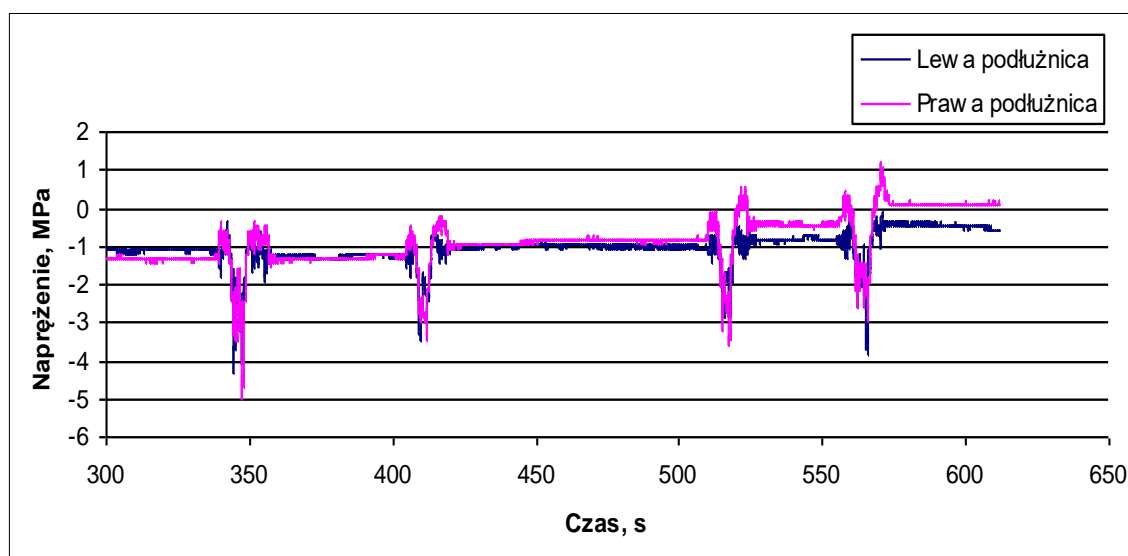
13.5.2. Pomiar wielkości naprężeń rzeczywistych metodami tensometrycznymi

Znając teoretyczne miejsca, gdzie naprężenia w ramie naczepy samowyladowczej były największe, możliwym było przeanalizowanie wartości tych naprężeń w miejscach wskazanych przez obliczenia analizy MES za pomocą metod tensometrycznych. Wynik z symulacji MES: największe naprężenia występowały w przedniej części naczepy - w miejscu zmiany wysokości podłużnic, warstwice największych naprężeń zlokalizowane były na dolnej półce podłużnic. Na podstawie analizy numerycznej można również stwierdzić, iż naprężenia zlokalizowane na dole półce podłużnicy, w miejscu zmiany jej wysokości były naprężeniami pochodzącymi od rozciągania. Z tego powodu tensometry naklejono w kierunku wzdłużnym do osi podłużnic. Sposób i miejsce naklejenia tensometrów przedstawiono na rys. 82.



Rys. 82. Miejsce naklejenia tensometrów

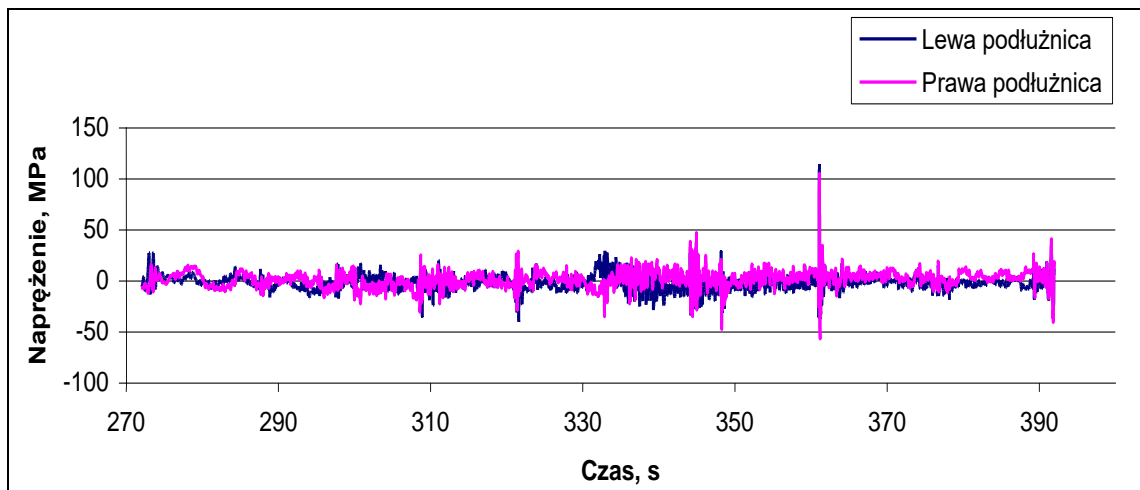
Przed rozpoczęciem pomiarów właściwych zmontowany układ pomiarowy został przewzorowany ze zmianą obciążenia co 250 N. Obciążniki układano w osi symetrii naczepy na jej długości gdzie zostały przyklejone tensometry. Poprawną reakcją układu na takie obciążenie miał być stopniowy i równomierny przyrost naprężenia w podłużnicach. Taką też reakcję układu zaobserwowano, świadczyło to o jego poprawnej pracy. Przebieg naprężeń w podłużnicach naczepy podczas prowadzonego testu przedstawiono na rysunku 83.



Rys. 83. Przebieg naprężeń w podłużnicach naczepy podczas wzorcowania układu pomiarowego

Badania przeprowadzono w dwóch typowych dla eksploatacji naczepy samowyładowczej warunkach ruchowych, dla dwóch stanów obciążenia naczepy. Przeanalizowano zmiany naprężeń podczas ruchu nieobciążonej oraz naczepy częściowo obciążonej naczepy z prędkością około 50 km/h po drodze o nawierzchni brukowej. Drugą analizowaną sytuacją był rozładunek naczepy, która w przypadku naczep samowyładowczych polegała na podnoszeniu przedniej części skrzyni ładunkowej. Przebieg naprężeń w takiej sytuacji przeanalizowano również w przypadku naczepy nieobciążonej i naczepy częściowo obciążonej.

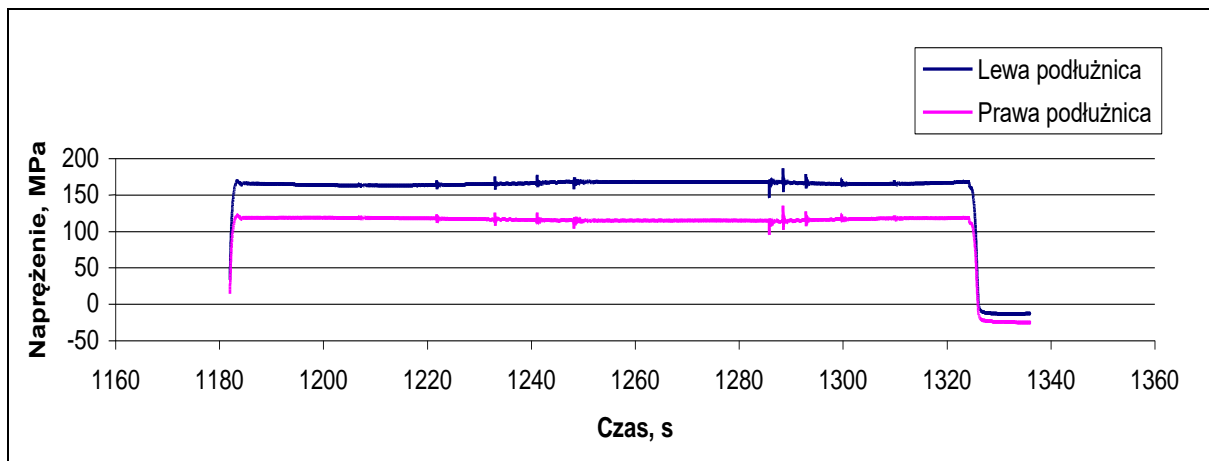
Badania rozpoczęto od pomiaru naprężeń w podłużnicach naczepy poruszającej się w stanie nieobciążonym po stosunkowo równej nawierzchni wykonanej z bruku. Przebieg naprężeń w takich warunkach ruchowych przedstawiono na rys. 84.



Rys. 84. Naprężenia w podłużnicach podczas jazdy nieobciążonej naczepy po nawierzchni asfaltowej z prędkością około 50 km/h

Naprężenia podczas takiego ruchu były naprężeniami stosunkowo niewielkimi, oscylującymi wokół wartości około 30 MPa. Widoczny skok naprężenia w podłużnicach o wartości powyżej 100 MPa zarejestrowany w około 360 sekundzie pomiaru pochodził od przejazdu zestawu (*ciągnik siodłowy + naczepa*) przez stosunkowo dużą wyrwę w nawierzchni jezdni.

Kolejną fazą badań był pomiar wartości naprężeń podczas podnoszenia oraz opuszczania nieobciążonej skrzyni ładunkowej naczepy. Zarejestrowany przebieg naprężeń podczas tej próby przedstawiono na rys. 85.



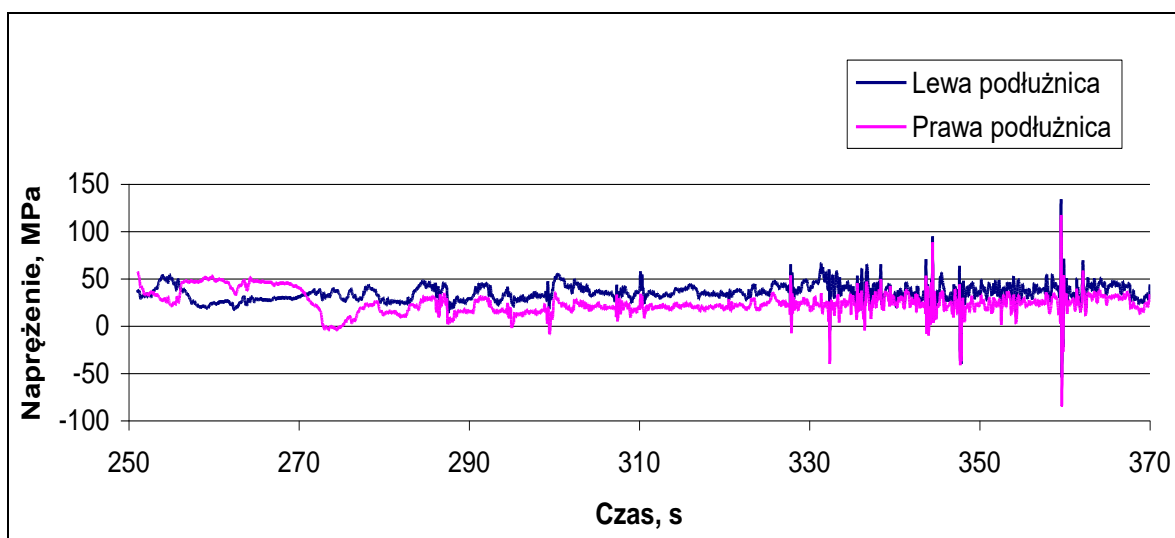
Rys. 85. Napężenia na podłużnicach naczepy podczas unoszenia przedniej części nieobciążonej skrzyni ładunkowej naczepy (*podnoszenie skrzyni ładunkowej*)

Podnoszenie przedniej części skrzyni ładunkowej trwało do około 1260 sekundy pomiaru, natomiast opuszczanie od 1280 sekundy. Zarejestrowane podczas takich czynności napężenia posiadały większą wartość od wartości naprężeń zarejestrowanych podczas ruchu naczepy po drodze o nawierzchni wykonanej z bruku. Napężenia zarejestrowane w lewej podłużnicy miały wartość powyżej 150 MPa. Różnica wartości naprężeń w lewej i prawej podłużnicy wynika prawdopodobnie z nierówności terenu, na którym ustawiona była naczepa podczas pomiaru. Widoczne na wykresie charakterystyczne, niewielkie skoki naprężeń w obu podłużnicach pochodziły od wstrząsów naczepy powodowanych uruchamianiem kolejnych sekcji podnośnika hydraulicznego, unoszącego przednią część skrzyni ładunkowej. Natomiast te same skoki zarejestrowane podczas opuszczania skrzyni ładunkowej pochodziły od wyłączenia kolejnych sekcji tegoż podnośnika. Naczepę podczas tego pomiaru przedstawiono na rysunku 86.



Rys. 86. Skrajne położenie skrzyni ładunkowej w czasie pomiaru naprężeń

Analogiczne próby przeprowadzono w przypadku jazdy oraz rozładunku naczepy częściowo obciążonej. Częściowe obciążenie polegało na załadunku do skrzyni ładunkowej naczepy masy około 15000 kg wilgotnego piasku. Ładunek ten został ułożony w środkowej części naczepy. Wyniki obrazujące przebieg naprężeń w podłużnicach naczepy przedstawiono na rysunku 87.

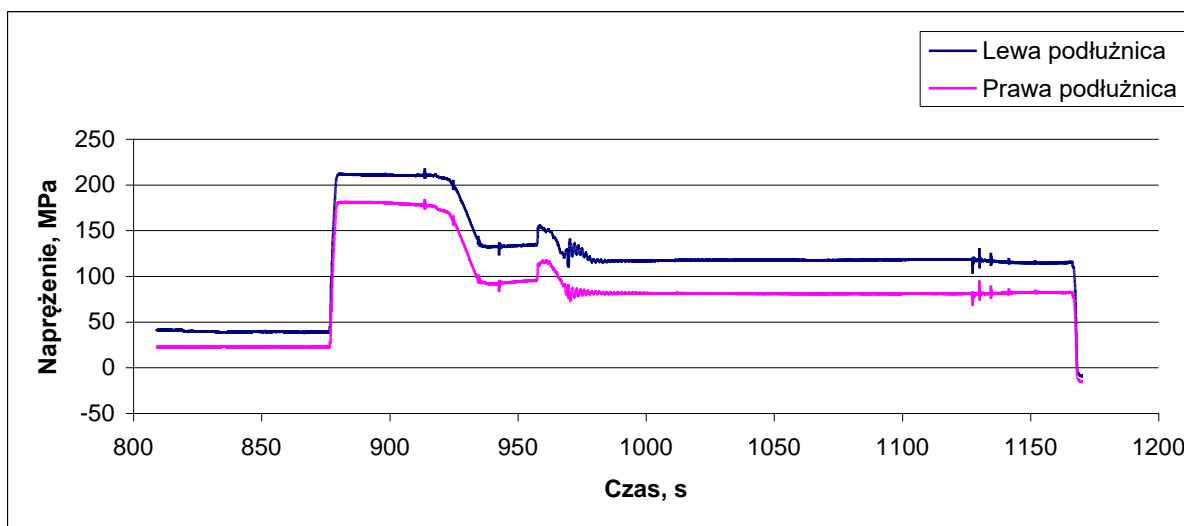


Rys. 87. Naprężenia w podłużnicach podczas jazdy częściowo obciążonej naczepy po nawierzchni asfaltowej z prędkością około 50 km/h

Na powyższym wykresie przedstawiono przebieg naprężeń w podłużnicach częściowo obciążonej naczepy poruszającej się z prędkością około 50 km/h po drodze o nawierzchni brukowej.

Od około 330 sekundy pomiaru naczepa wjechała z tą samą prędkością na obszar drogi, w którym znajdowały się pojedyncze wyrwy w jezdni. Wyrwy te były powodem pojawienia się naprężeń o nieco większych wartościach.

Następnie przeanalizowano wartości naprężeń podczas podnoszenia oraz opuszczania skrzyni ładunkowej częściowo obciążonej. Wyniki uzyskane w takich warunkach eksploatacji przedstawiono na rysunku 88.



Rys. 88. Naprężenia na podłużnicach naczepy podczas rozładunku (*podnoszenie skrzyni ładunkowej zawierającej 15000 kg piasku*)

Wykres przedstawia przebieg naprężeń w podłużnicach naczepy podczas podnoszenia częściowo obciążonej skrzyni ładunkowej w celu rozładunku. Zarejestrowane wartości wskazywały, że były to warunki najbardziej obciążające podłużnice naczepy. Wartość naprężeń w lewej podłużnicy wynosiła ponad 200MPa. Widoczne skoki wartości naprężeń w obu podłużnicach podczas podnoszenia skrzyni ładunkowej (*do około 1050 sekundy pomiaru*) były skokami pochodzącymi od uruchamiania kolejnych sekcji podnośnika hydraulicznego. Widoczny spadek wartości naprężeń podczas podnoszenia skrzyni ładunkowej (*około 930 sekunda pomiaru*) spowodowany był faktem iż już podczas podnoszenia skrzyni ładunkowej obciążający naczepę piasek zaczął się zsuwać, co skutkowało obniżeniem wartości naprężeń. Po osiągnięciu swojej maksymalnej wysokości, na którą podniesiona została przednia część skrzyni ładunkowej (*około 1000 sekunda pomiaru*) odczekano chwilę (*do około 1120 sekundy*) oraz rozpoczęto opuszczanie skrzyni. Widoczne od tego czasu niewielkie skoki naprężeń spowodowane były drganiem naczepy pochodzącymi od wyłączania kolejnych sekcji podnośnika hydraulicznego.

Różnice w wartościach uzyskanych na drodze numerycznej analizy z użyciem programu MES oraz na drodze pomiarów z wykorzystaniem metod tensometrycznych wartości naprężeń w przypadku unoszenia przedniej części obciążonej skrzyni wynosiły około 50 MPa. Różnice te wynikały prawdopodobnie z nieuwzględnienia w analizach numerycznych nierówności terenu, na którym ustawiona była naczepa podczas rozładunku oraz faktu, iż podczas pomiaru tensometrycznego mogły wystąpić pierwsze objawy zsuwania się ładunku. Powodem wystąpienia różnic mogły być pewne niedokładności stworzonego modelu geometrycznego ramy naczepy.

13.6. Omówienie wyników badań zasadniczych i wnioski

Z danych literaturowych wynikało, iż duże udziały drobnoziarnistego ferrytu AF wchodzącego w skład struktury metalograficznej stopiwa powodują, iż stopiwo takie charakteryzuje się dobrymi właściwościami plastycznymi (*wysoką udarnością*) [78÷82]. Zostało to również potwierdzone w przeprowadzonych badaniach. Stopiwa wykonane metodami niskotlenowymi (*EB oraz TIG*) wykazały się wyższą energią łamania w stosunku do stopiw wykonanych metodami średniotlenowymi. Największą udarnością wykazało się stopiwo wykonane otuloną elektrodą zasadową. Energia łamania dla takiego stopiwa w temperaturze +20°C wynosiła średnio 201 J. Stopiwo wykonane otulonymi elektrodami zasadowymi charakteryzowało się zawartością tlenu w stopiwie około 350 ppm oraz ma w swej strukturze najwyższą zawartością drobnoziarnistego ferrytu AF. Nieco niższą energią łamania 193 J wykazało się stopiwo wykonane drugą z badanych metod niskotlenowych, stopiwo wykonane metodą TIG. Stopiwo takie charakteryzowało się niższą od stopiwa zasadowego zawartością tlenu, która wynosiła około 280 ppm. Struktura tego stopiwa zawierała nieco mniej drobnoziarnistego ferrytu AF. Stopiwa wykonane metodami średniotlenowymi charakteryzowały się wyraźnie niższymi pracami łamania w temp dodatniej: stopiwo wykonane otulonymi elektrodami rutowymi 178 J oraz stopiwo wykonane metodą MAG 175 J. Podobny względny rozkład wyników uzyskano w przypadku próby udarności prowadzonej w temperaturze ujemnej. Jednak różnice w pracy łamania uzyskane w tej próbie nie były już tak wyraźne. Wyniki badań prowadziły, zatem do wniosku, iż istotnie zawartość drobnoziarnistego ferrytu AF wpływa na energię łamania stopiwa, zarówno w temperaturze dodatniej jak i ujemnej. Wniosek ten potwierdzono, prowadząc badania udarności stopiw wykonanych otulonymi elektrodami przygotowanymi w warunkach laboratoryjnych. Stopiwa takie charakteryzowały się różnymi zawartościami tlenu (*od 350 do 680 ppm*) oraz jak ustalono w badaniach wstępnych różnymi

zawartościami drobnoziarnistego ferrytu AF w stopiowie (od 28% do 63%). Wyniki badań udarnościami tych stopiw wykazały, iż wraz ze wzrostem zawartości tlenu w stopiowie energia łamania stopiw oraz zawartość drobnoziarnistego ferrytu AF malały.

Kolejnym punktem badań o charakterze eksploatacyjnym było badanie udarnościami stopiw wstępnie odkształconych oraz wyprostowanych. Taki sposób przygotowania próbek miał symulować złącze spawane, znajdujące się w odkształconej plastikach ramie pojazdu ciężarowego po naprawie polegającej na statycznym prostowaniu. Próbkami stopiw odkształcano obciążeniem statycznym oraz dynamicznym, miało to symulować różne sposoby odkształcenia ramy pojazdu ciężarowego. Dynamiczne odkształcenie – odkształcenie na skutek wypadku drogowego, statyczne odkształcenie – odkształcenie na skutek np. niewłaściwie prowadzonego załadunku lub rozładunku pojazdu. Uzyskane w tej próbie wyniki wskazały na mniejsze spadki pracy łamania odkształconych i wyprostowanych stopiw wykonanych metodami niskotlenowymi w stosunku do stopiw nieodkształconych. Największym spadkiem wartości energii łamania wykazało się stopiwo wykonane otuloną elektrodą rutyłową – spadek pracy łamania stopiwa odkształconego dynamicznie oraz wyprostowanego w stosunku do pracy łamania stopiwa nieodkształconego wynosił w tym przypadku niespełna 44%. Najmniejszym spadkiem pracy łamania wykazało się stopiwo o największym udziale drobnoziarnistego ferrytu AF w strukturze metalograficznej, stopiwo wykonane otuloną elektrodą zasadową. W przypadku odkształcenia tego stopiwa obciążeniem o charakterze dynamicznym oraz późniejszym wyprostowaniu – praca łamania zmniejszyła się tylko o 8% w stosunku do pracy łamania stopiwa nieodkształconego. Uzyskane wyniki wskazują na to, iż drobnoziarnisty ferryt którego ilość związana jest z ilością tlenu w stopiowie ma również pozytywny wpływ na zachowanie własności plastikach złączy spawanych po odkształceniu i wyprostowaniu złącza. Próbę przeprowadzono również w temperaturze ujemnej jednak wyniki badań w większości przypadków wynosiły znacznie poniżej 40 J. Ze względu na tak niskie energie łamania stopiw w ujemnej temperaturze wydaje się koniecznym opracowanie metod spawalniczych gwarantujących uzyskanie stopiw o dobrych właściwościach eksploatacyjnych również w niskich temperaturach, metod niejako dedykowanych do zabiegów spawalniczych prowadzonych w ramach pojazdów ciężarowych. Z danych literaturowych [133, 80] wynikało, że stopiwa zasadowych elektrod otulonych wykonanych w warunkach laboratoryjnych (z dodatkiem Ni i Mn) charakteryzują się lepszymi właściwościami plastikachymi w niskich temp od standardowych stopiw elektrod zasadowych.

Uzyskane wyniki badań wskazują, iż ze względu na możliwość wystąpienia sytuacji, w której złącza spawane znajdujące się w ramie pojazdu ciężarowego zostaną w jakiś sposób odkształ-

cone oraz naprawione poprzez statyczne prostowanie bardziej przydatnymi zarówno do naprawy jak i przeróbek ram pojazdów ciężarowych są metody niskotlenowe.

Podczas eksploatacji pojazdów ciężarowych, ramy pojazdów oraz spawane złącza występujące w tych ramach narażone są na szereg oddziaływań również o innym charakterze niż udary siły np. obciążenia o charakterze statycznym. W warunkach pracy złącza spawanego w ramie pojazdu ciężarowego istotne są własności plastyczne, ale oprócz nich równie ważne są własności wytrzymałościowe np. wytrzymałość doraźna. Konstrukcje spawane ram pojazdów ciężarowych niejednokrotnie przenoszą znaczne obciążenia o charakterze rozciągającym. Dodatkowo jak wynikało z literatury miejsca gdzie w ramach pojazdów ciężarowych zlokalizowane były połączenia spawane stawały się tzw. koncentratorami naprężeń. Połączenia spawane znajdujące się w ramach pojazdów ciężarowych muszą, więc charakteryzować się wysoką wytrzymałością na rozciąganie. Przeanalizowano własności wytrzymałości doraźną stopiw wykonanych badanymi metodami o różnej zawartości tlenu. Jak wynikało z uzyskanych wyników poza najlepszą udarnością, również najlepszą wytrzymałością na rozciąganie charakteryzowało się stopiwo o największej zawartości drobnoziarnistego ferrytu AF, stopiwo wykonane otulonymi elektrodami zasadowymi. W przypadku tego stopiwa wytrzymałość na rozciąganie R_m wynosiła 520 MPa. Najniższą wytrzymałością na rozciąganie wykazało się stopiwo wykonane metodą MAG 475 MPa. Granice plastyczności badanych stopiw mieściły się w przedziale 427 MPa ÷ 325 MPa. Przy czym wartość najwyższa była wartością ustaloną dla stopiwa wykonanego otuloną elektrodą zasadową, natomiast wartość najniższa była wartością uzyskaną w przypadku rozciągania próbek wykonanych metodą MAG. Z badań wynikało iż własności wytrzymałościowe stopiw również zależą od udziałów drobnoziarnistego ferrytu AF w ich strukturach metalograficznych. Jednak dało się zauważyć iż rozrzut uzyskanych wyników wartości R_m dla badanych metod spawalniczych (8,56%) był mniejszy od rozrzutu wyników pracy łamania (12,9%). Stwierdzić należało iż zawartość drobnoziarnistego ferrytu AF w większym stopniu wpływa na udarność złącza spawanego (*właściwości plastyczne*) niż na jego wytrzymałość na rozciąganie. Potwierdzeniem takiego twierdzenia były znaczne różnice wartości granicy plastyczności, które w badanym obszarze metod spawalniczych wynosiły 23, 8%.

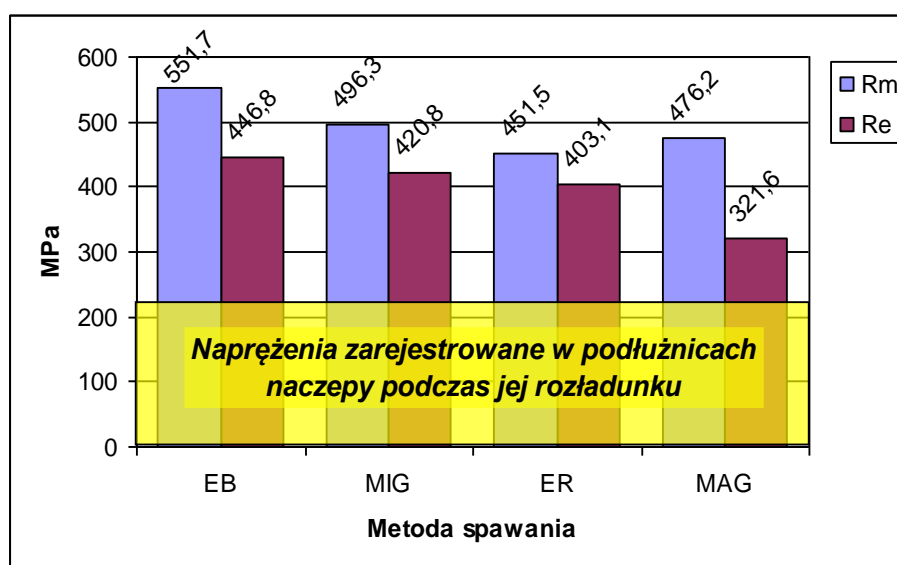
Poza właściwościami plastycznymi oraz wytrzymałościowymi niezmiernie ważna w kontekście zastosowania spawania w ramach pojazdów ciężarowych była wytrzymałość zmęczeniowa badanych stopiw. Wymóg taki wynikał z faktu iż w większości warunków ruchowych w ramach pojazdów ciężarowych istnieją zmienne naprężenia o stosunkowo niewielkich wartościach lecz występujące w sposób niemalże ciągły. Naprężenia takie mogą

wynikać jazdy pojazdu ciężarowego po nawet bardzo niewielkich nierównościach drogi. O istotności wymogu wysokiej wytrzymałości zmęczeniowej złączy spawanych wchodzących w skład ramy pojazdów ciężarowych świadczyć może fakt, iż pęknięcia zmęczeniowe ram pojazdów ciężarowych należą do najczęstszych przyczyn przejścia ramy w stan niezdatności eksploatacyjnej. Przeprowadzone badania uwidoczniły również i tym przypadku przewagę właściwości stopiw wykonanych metodami niskotlenowymi nad właściwościami stopiw metod średniotlenowych. Najwyższą wytrzymałością zmęczeniową wykazało się również i w tym przypadku stopiwo o największym udziale drobnoziarnistego ferrytu AF w strukturze, stopiwo wykonane otuloną elektrodą zasadową. Próbkę stopiwa wykonanego tą metodą spawania osiągnęły podstawę zmęczenia dla połączeń spawanych $2 \cdot 10^6$ cykli przy wartości naprężenia 297,12 MPa. Najniższą uzyskaną w badaniach wytrzymałością zmęczeniową wykazały się próbki stopiwa wykonanego otuloną elektrodą rutilową. W tym przypadku przyjętą podstawę zmęczenia próbki osiągnęły przy naprężeniu 237 MPa. Zatem różnica pomiędzy najwyższą a najniższą wartością wytrzymałości zmęczeniowej wynosiła 20,2%. Była to znaczna różnica, która wskazywała na związek pomiędzy zawartością drobnoziarnistego ferrytu AF w stopiwie a wytrzymałością zmęczeniową stopiwa.

Dodatkowo, aby była możliwa ocena wyników przeprowadzonych badań w odniesieniu do rzeczywistych warunków eksploatacji przeprowadzono pomiar rzeczywistych naprężeń występujących w spawanej ramie pojazdu ciężarowego. Pomiar prowadzono w typowych warunkach eksploatacji. Badania te rozpoczęto analizy wielkości momentów gnących w podłużnicach ramy nośnej ciężarowej naczepy samowyładowczej. Obliczenia uwidoczniły, iż największy moment gnący powodujący występowanie w podłużnicach maksymalnych naprężeń zlokalizowany był w odległości około 2,5 m od przedniej części ramy. Następnie przeprowadzono numeryczną analizę modelu ramy naczepy samowyładowczej z użyciem programu MES. Analiza wskazała, iż największe naprężenia zarówno podczas postoju naczepy jak i podczas jej rozładunku występują w przedniej części ramy, w miejscu gdzie zmienia się wysokość podłużnic. Najwyższa, wynikająca z komputerowej symulacji wielkość naprężeń w miejscu zmiany wysokości podłużnic, występowała podczas rozładunku naczepy i wynosiła 170 MPa w dolnej półce podłużnicy. Zweryfikowano tak uzyskaną wartość naprężeń we wskazanym przez program wykorzystującym metodę MES miejscu i w nim właśnie naklejone zostały tensometry oraz przeprowadzony został pomiar naprężeń w rzeczywistych warunkach. Najwyższa wartość naprężeń uzyskana podczas pomiaru tensometrycznego wynosiła w miejscu wskazanym przez program bazujący na metodzie MES: 210 MPa. Była to wartość zarejestrowana podczas rozładunku naczepy. Była to, zatem wartość większa od uzyskanej na dro-

dze analizy numerycznej o około 30 MPa. Różnice w wartościach mogły być spowodowane nie uwzględnieniem w analizach numerycznych nierówności nawierzchni, na jakiej ustawiona była podczas rozładunku naczepa. Kolejnym powodem pojawienia się rozbieżności w wynikach mógł być fakt, iż analiza numeryczna rozładunku naczepy prowadzona była z założeniem statyczności. Natomiast pomiar metodami tensometrycznymi prowadzony był w warunkach rzeczywistych, w których część ładunku znajdującego się w skrzyni ładunkowej naczepy zaczęła się podczas unoszenia przedniej części skrzyni ładunkowej zsuwać po jej podłodze. Taki stan rzeczy mógł istotnie wpłynąć na wielkość naprężeń w podłużnicach naczepy oraz tym samym spowodować różnice wyników pomiarów tensometrycznych w stosunku do wyników uzyskanych na drodze analizy numerycznej MES.

Uzyskane podczas pomiaru metodami tensometrycznymi wielkości naprężeń w podłużnicach ramy pojazdu ciężarowego odniesiono do wyników badań wytrzymałości na rozciąganie stopiw. Zestawienie wyników badań przedstawiono na rysunku 89.



Rys. 89. Naprężenia na podłużnicach naczepy podczas rozładunku (podnoszenie obciążonej skrzyni ładunkowej) oraz wytrzymałość złączy spawanych

Z przedstawionego na rysunku 88 zestawienia wyników badań wynikało iż wytrzymałość wszystkich badanych stopiw była większa od zarejestrowanej wielkości naprężeń występujących w podłużnicach spawanej ramy samowyladowczej naczepy. „Zapas bezpieczeństwa” w przypadku stopiw wykonanych metodami niskotlenowymi był znacznie większy od tego, jaki występował w przypadku stopiw wykonanych pozostałymi badanymi metodami.

Na podstawie analizy literatury oraz uzyskanych wyników badań własnych sformułowano następujące wnioski:

- 1) *Największą udarnośćią charakteryzują się złącza spawanej ramy wykonane elektrodami zasadowymi.*
- 2) *Inne metody niskotlenowe (MIG, TIG) gwarantują powstanie złączy o odpowiednio wysokich właściwościach mechanicznych.*
- 3) *Udarność naprawianego przez odkształcenie plastyczne złącza spawanego maleje o około 13% w stosunku do udarności złącza nieodkształcanego.*
- 4) *O dobrych właściwościach spawanych połączeń elementów pojazdów ciężarowych stanowi ich wysoka udarność, wytrzymałość doraźna oraz zmęczeniowa, które zależą od zawartości tlenu w stopiwie decydującej o ilości drobnoziarnistego ferrytu AF.*
- 5) *Naprawy oraz przebudowy ram pojazdów ciężarowych w zakres, których wchodzi proces spawania powinny być prowadzone z użyciem metod niskotlenowych, co potwierdza postawioną tezę;*
- 6) *Zastosowanie niskotlenowych metod spawania w naprawach i przebudowach ram pojazdów ciężarowych spowodują zwiększenie poziomu bezpieczeństwa biernego.*

Literatura

- [1] „*Polska hossa na rynku ciężarówek*” – Samochody Specjalne, tom 11, nr 3, 2007,
- [2] „*Boom transportowy*”- Auto Świat nr 43, 2007.
- [3] Rychter T.: „*Mechanik pojazdów samochodowych*” Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2006.
- [4] Raatz B.: „*Blacharstwo naprawy powypadkowe*” Wydawnictwo Troton Warszawa 2007.
- [5] Kowalewski A.: „*Pomiary oraz naprawa ram i karoserii*”, Poradnik Serwisowy 6/2008 Wydawnictwo Instalator Polski, Warszawa 2008.
- [6] Kostrzewa S., Nowak B.: „*Podstawy regeneracji części pojazdów samochodowych*”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1986.
- [7] „*Powypadkowe naprawy pojazdów użytkowych*”, Auto Expert 2, str. 31÷36, 2002.
- [8] „*Powypadkowe naprawy pojazdów ciężarowych*”, Auto Expert 12, str. 23÷26, 1998.
- [9] Adamiec P.: „*Wymagania przy naprawach samochodów metodami spawalniczymi w świetle norm jakości PN-ISO 9000*”, IV Konferencja Naukowo-Techniczna Diagnostyka Pojazdów Samochodowych 14 stycznia 2000 Katowice.
- [10] Rusiński E., Porada D.: „*Komputerowe wspomaganie projektowania ram cz. 1*” Samochody Specjalne, tom 4, nr 6, 2000.
- [11] Rusiński E., Porada D.: „*Komputerowe wspomaganie projektowania ram cz. 2*” Samochody Specjalne, tom 5, nr 1, 2001.
- [12] Soboń E.L.: „*Bezpieczeństwo pojazdów ciężarowych*”, Auto Expert 8, 2000.
- [13] Soboń E.L. : „*Bezpieczeństwo ruchu pojazdów ciężarowych*”, Auto Expert 3, 1998.
- [14] Figueredo M. V., Oliviera F.M.F., Goncalves J.P.M., Castro P.M.S.T., Fernandes A.A.: “*Fracture analysis of fork of heavy duty lift truck*” Engineering Failure Analysis 8, 2001.
- [15] D. V. Nieburh: “*Metallurgical Failure Analysis of Horse Trailer: Criminal Investigation*”, JFA PBC 2006, 4:11-16.
- [16] Kowalczyk M., Rusiński E.: „*Wybrane zagadnienia z numerycznego Crash testu autobusu*”, Samochody Specjalne, tom 6, nr 3, 2002;
- [17] Rusiński E., Serafin T.: „*Wybrane zagadnienia bezpieczeństwa biernego nowej generacji autobusów*”, Samochody Specjalne, tom 3, nr 2, 1999;
- [18] Rusiński E., Karliński J., Janisiów T.: „*Badania symulacyjne specjalistycznego pojazdu do przewozu ludzi i towarów*”, Samochody Specjalne, tom 5, nr 6, 2001;

- [19] Rusiński E., Karliński J.: „*Badania bezpieczeństwa kabin ochronnych pojazdów górniczych*”, Samochody Specjalne, tom 5, nr 5, 2001;
- [20] Miros M., Hadryś D.: „*Naprawa Powypadkowych Części samochodów Osobowych i Ciężarowych z Wykorzystaniem Metod Spawalniczych*” – Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Transport z. 61, nr Kol 2007/1704;
- [21] Prochowski L., Żuchowski A.: „*Samochody ciężarowe i autobusy*”, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006;
- [22] Kuczyński Z.: „*Mechanik pojazdów samochodowych cz.I*”, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1974;
- [23] Orzełowski S.: „*Budowa podwozi i nadwozi samochodowych*” Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1995;
- [24] Dokument SCANIA 11:01-01: „*Ramy podwozia*” Scania CVAB 2003;
- [25] Instrukcja obsługi naczepy samowyładowczej, wydana przez Zakład Budowy i Remontu Naczep „*BODEX*”, Szczerców 2008,
- [26] Materiały informacyjne firmy „*Wielton*”, 2008 ;
- [27] „*Pojazdy z zabudowami specjalistycznymi*” Samochody Specjalne, tom 8, nr 6, 2004;
- [28] Lubczyński M., Mazurek S.: „*Samochody samowyładowcze*”, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1978;
- [29] „*Samochodowe nadwozia specjalne*”, Auto Expert 3, str. 31÷34, 1999.
- [30] Strachowski P., Szczyż M.: „*Projektowanie i budowa ciężkiego pojazdu holowniczego*” Samochody Specjalne, tom 10, nr 3, 2006.
- [31] Rutka M.: „*Samochody pomocy drogowej*” Samochody Specjalne, tom 11, nr 4, 2007.
- [32] „*Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 16 lipca 2002 roku w sprawie rodzajów urządzeń technicznych podlegających dozorowi technicznemu*” pobrane z <http://isip.sejm.gov.pl/servlet/Search?todo=file&id=WDU20021201021&type=2&name=D20021021.pdf>, dostęp dnia 09.04.2009 roku;
- [33] Ludwig M.: „*Wytrzymałość na skręcanie ram podwozi pojazdów ciężarowych*”, Publikacja Wojskowego Instytutu Techniki Panczernej i Samochodowej 1982.
- [34] „*Ubrania z krótkim terminem ważności*”, pobrany z <http://magazine.volvo Trucks.com/pl/Articles/International/2008/10/Ubrania-z-krotkim-terminem-wanoci/UBRANIA-ZKROTKIM-TERMINEM-WANOCI/.pdf>, data dostępu 13.01.09
- [35] Ferenc M.: „*Samochodowe ramy podźwirowe*” Samochody Specjalne, tom 5, nr 2, 2001.

- [36] Bąk M.: „*Żurawie samochodowe*” Samochody Specjalne, tom 9, nr 4, 2005.
- [37] „*Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 28 grudnia 2001 roku w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego jakim powinny odpowiadać dźwigniki*” pobrane z <http://www.udt.gov.pl/pdf/przepisy/D20020043.pdf>, dostęp dnia 09.04.2009
- [38] Siwiński T.: „*Praktyczne naczepy*” Samochody Specjalne, tom 9, nr 4, 2005.
- [39] Piernikarski D.: „*System nadwozi wymiennych*” Samochody Specjalne, tom 11, nr 6, 2007.
- [40] Leśniak K.: „*Wywrotki spod znaku niebieskiego słonia*” Samochody Specjalne, tom 11, nr 11, 2007.
- [41] Dokument MAN: „*Truck technology Generation A (TG-A)*”, pobrany z http://www.manted.de/manted/aufbaurichtlinien/pdf/tga_pl.pdf., dostęp dnia 20.11.2006
- [42] Dokument MAN „*Modyfikacje Podwozi*”, pobrany z http://www.manted.de/manted/aufbaurichtlinien/pdf/modyfikacje_pl.pdf, dostęp dnia 20.11.2006.
- [43] Karol Przybyłowicz.: „*Metaloznawstwo – wydanie ósme, poprawione*”, Podręczniki Akademickie – Mechanika, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2009.
- [44] Reński A.: „*Budowa Samochodów*” Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
- [45] Osiński J., Żach P.: „*Wybrane zagadnienia recyklingu samochodów*”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006.
- [46] Adamiec P., Dziubiński J.: „*Wybrane zagadnienia materiałów konstrukcyjnych i technologii wytwarzania pojazdów*” Wydawnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
- [47] William F. Smith: „*Principles of Materiale Scence and Engenering*”, McGraw-Hill Companies 2002.
- [48] Ferenc K., Ferenc J.: „*Konstrukcje spawane. Połączenia*”, wydanie 2 zmienione, WNT Warszawa 2003.
- [49] Piwnik J.: „*Mechanika procesów wyciskania metali*”, Rozprawy Naukowe nr 6, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 1991.
- [50] Pilarczyk J.: „*Spawanie i napawanie elektryczne metali*”, Wydawnictwo Śląsk 1996.
- [51] Jacenko N.: „*Drgania, wytrzymałość i przyspieszone badania samochodów ciężarowych*”, WKiŁ, Warszawa 1975.
- [52] Matyja T., Sładkowski A.: „*Modeling of the lift crane vibration caused by the lifting loads*”, Międzynarodowa Konferencja Zdvihaci Zarizeni v Teorii a Praxi, p. 98-105, Brno 2007.

- [53] Rusiński E., Kowalczyk M.: „*Zasady przedłużania ram samochodowych*” Samochody Specjalne, tom 6, nr 7, 2003.
- [54] Rusiński E., Moczko P., Smolnicki T.: „*Obliczenia wytrzymałościowe samochodowej burty załadowniczej*” Samochody Specjalne, tom 6, nr 2, 2002.
- [55] Rusiński E., Moczko P., Smolnicki T.: „*Zasady przedłużania ram samochodowych*” Samochody Specjalne, tom 6, nr 2, 2002.
- [56] Kocianda S., Szala J.: „*Podstawy obliczeń zmęczeniowych*”, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1985.
- [57] Yoshito I., Chunlu L., Ryuichi K.: „*Dynamic simulation of collision of heavy high speed trucks with concrete barriers*”, Chaos, Solitons and Fractals 34, 2007.
- [58] Poh K.W., Dayawansa P.H., Dickerson A.W., Thomas I.R.: “*Steel membrane floors for bodies of large rear dump mining trucks*” Finite Elements In Analysis and Design 32, 1999.
- [59] Chodomski A.W.: „*Badania modelowe pojazdów gąsienicowych i kołowych*”, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1982.
- [60] Damberg E.: „*Oddziaływanie parametrów samochodu oraz sposobu jazdy na siły dynamiczne na kole samochodów użytkowych podczas ich jazdy terenowej*”, Publikacja Wojskowego Instytutu Techniki Pancernej i Samochodowej, Sulejówek 1971.
- [61] Arczyński S.: „*Mechanika ruchu samochodu*”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1993.
- [62] Dokument Iveco Daily: „*Dyrektywy dla transformacji i zabudowy*” publikacja nr. 603.43.633, 2006.
- [63] Dokument Iveco Stralis Trakker: „*Body and Chassis Repair Manual*”, publication no. 603.93.481, 2005.
- [64] Dokument Scania: „*Spawanie ramy podwozia*” Scania CVAB 2009, Sweden, pobrany z: http://til.scania.com/groups/bwd/documents/bwm/bwm_0000410_14.pdf, data dostępu 14.12.2009.
- [65] Zagaja J., Grabowski A.: „*Autoryzowana Instrukcja Napraw Samochody Żuk*”, Fabryka Samochodów w Lublinie, Wydawnictwo WEMA 1992.
- [66] Zagaja J., Grabowski A., Charytanowicz T.: „*Naprawa samochodów Lublin*”, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1997;
- [67] Bańczak E.: „*Naprawa samochodów Nysa*”, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980.

- [68] Koenig Z., Kukliński Z., Pałacha R.: „*Instrukcja naprawy samochodów Star 28, Star 29, Star 38*”, Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego, Warszawa 1983.
- [69] „*Naprawy samochodów ciężarowych Jelcz 315-316-317*”, Wydawnictwo Katalogów i cenników, Warszawa 1970.
- [70] „*Naprawy bieżące, średnie i drobne samochodów ciężarowych Jelcz 315-316-317*” Wydawnictwo Katalogów i cenników, Warszawa 1971.
- [71] Adamiec P., Dziubiński J., Filipczyk J.: „*Technologia napraw pojazdów samochodowych*”, Politechnika Śląska 2002.
- [72] Orzełowski S.: „*Naprawa i obsługa pojazdów samochodowych*”, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2006.
- [73] Butnicki S.: „*Spawalność i kruchość stali*”, Wydawnictwa Naukowo- Techniczne, Warszawa 1975.
- [74] Tasak E.: „*Spawalność stali*”, Wydawnictwo Fotobit, Kraków 2002.
- [75] Tasak E.: „*Obróbka ubytkowa i spajanie*”, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo- dydaktyczne, Kraków 2001.
- [76] Poradnik Inżyniera: *Spawalnictwo Tom I*, Wydawnictwa Naukowo- techniczne, Warszawa 1983.
- [77] Poradnik Inżyniera: *Spawalnictwo Tom II*, Wydawnictwa Naukowo- techniczne, Warszawa 1983.
- [78] Węgrzyn T.: „*Tlen i azot w stalowym stopiwie wykonanym łukowymi metodami*”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [79] Sudarsanam S.B.: „*The mechanism of Acicular Ferrite*”, Current opinion in Solid state and Material Science 8, 2004.
- [80] Węgrzyn T., Miros M.: „*Spawanie stalowych ram samochodów ciężarowych elektrodami otulonymi*” - Przegląd Spawalnictwa. 11.2007.
- [81] Węgrzyn T., Hadryś D., Miros M.: „*Połączenia spawane wykonywane podczas napraw powypadkowych pojazdów samochodowych*”, Przegląd Spawalnictwa, nr 2/2008;
- [82] Węgrzyn T., Hadryś D., Miros M.: „*Spawane i zgrzewane stalowe połączenia w nadwoziach pojazdów samochodowych*”, Zeszyty Politechniki Rzeszowskiej, nr 256/2008.
- [83] Yang J. R., Abson D.J. , Dolby R.E.: "*Acicular Ferrite Transformation in Alloy-Steel Weld Metals*", Journal of Materials Science, Vol. 26, 1991, 839-845.
- [84] Babu S. S., Bhadeshia H. K. D. H. „*Stress and the Acicular Ferrite Transformation*" Materials Science and Engineering A, Vol. A156, 1992, 1-9.

- [85] Rees G. I., Mori N.: „*Thermodynamics of Acicular Ferrite Nucleation*”
Materials Science and Technology, Vol. 10, 1994, pp. 353-358.
- [86] David S. A., Vitek J. M.: „*Models for Acicular Ferrite*”, International Trends in Welding Research, ASM International, Ohio, USA, 1992, pp. 213-222.
- [87] Tae-Kyu L.E., Kim H. J., Kang B. Y., Hwang S. K.: „*Effect of inclusion size on the nucleation of acicular ferrite in welds*”, ISIJ International, Vol. 40 (2000), No.12, p. 1260–1268.
- [88] Mazancová E., Jonšta Z., Wyslych P., Mazanec K.: „*Acicular ferrite and bainite microstructure properties and comparison of their physical metallurgy response*”, Materials of Conference: Metal 2005, Hradec nad Moravicí: 24. – 26. 05. 2005.
- [89] Madariaga I., Romero J. L., Gutierrez I.: „*Upper acicular ferrite formation in a medium-carbon microalloyed steel by isothermal transformation: Nucleation enhancement by CuS*”, Metallurgical and Materials Transactions March 1, 1998.
- [90] Diaz-Fuentes M.; Iza-Mendia A.: „*Analysis of different acicular ferrite microstructures in low-carbon steels by electron backscattered diffraction. Study of their toughness behavior*”, Metallurgical and Materials Transactions November 1, 2003.
- [91] Madariaga I.; Bhadeshia H. K. D. H.: „*Acicular ferrite morphologies in a medium-carbon microalloyed steel*”, Metallurgical and Materials Transactions September 1, 2001.
- [92] He K., Edmonds D. V.: „*Formation of acicular ferrite and influence of vanadium alloying*”, Materials Science and Technology, March 2002 Vol. 18, p. 289-296.
- [93] Zhong Z.Y., Saka H., Kim T.H., Holm E.A., Han Y.F., Xie X.S.: „*Formation and control of the acicular ferrite in low carbon microalloying steel*”, Materials Science Forum, Vol. PRICM-5, January 2005.
- [94] Sugden A. A. B., Bhadeshia H. K. D. H.: „*Lower acicular ferrite*”, Metallurgical Transactions A, Volume 20, Issue 9, pp.1811-1818.
- [95] Chang Kyu Rhee: „*Effect of Vanadium on Development of Acicular Ferrite Microstructure in Low Carbon Steel*”, Solid State Phenomena Vol. 135, February 2008.
- [96] Biswas D.K., Kulkarni G.J.: „*Nucleation of Proeutectoid Ferrite at Manganese-Sulphide Inclusion Sites in HY-80 Steel*”, Materials of International Offshore and Polar Eng. Conference, Honolulu, 1997.
- [97] Sylvain St-Laurent and Gilles L'Esperance: „*Effects of Chemistry and size distribution of inclusions on the nucleation of acicular ferrite of C-Mn steel shielded-metal-arc-welding weldments*”, dokument MIS: IIW Doc II-A-900-93, 1993.

- [98] Bolshakov V. I., Laukhin D. V., Sukhomlin G. D., Kuksenko V. I.: „*Effect of heat treatment on formation of acicular ferrite and on the properties of low-carbon microalloyed steels*”, Metal Science and Heat Treatment Volume 46, Numbers 11-12 / November, 2004
- [99] Węgrzyn T., Miros M.: „*Wtrącenia niemetaliczne w stopiwi elektrod rutytowych*” Przegląd Spawalnictwa 12. 2007;
- [100] Węgrzyn T., Szopa R., Miros M.: „*Wtrącenia niemetaliczne w stopiwi elektrod otulonych stosowanych do spawania stali niskowęglowej i niskostopowej*”, Przegląd Spawalnictwa. 04. 2008;
- [101] Węgrzyn T., Miros M.: „*Inclusions In Steel Coated Electrodes Welds Of Car Body*”, Problemy Transportu, Tom 2, Zeszyt 4
- [102] Węgrzyn T., Silva A., Szopa R., Miros M., Hadryś D.: „*Wpływ stężenia tlenu w stopiwi elektrod na wielkość wtrąceń niemetalicznych oraz jego udarność*”, Monografia Praca Zdrowie Środowisko, Wszop, Katowice 2008.
- [103] Węgrzyn T., Mirosławski J., Silva A., Pinto G., Miros M.: „*Oxide inclusions in steel Welds of car body*”, konferencja Materials, Lisboa April 5-8 2009.
- [104] T. Węgrzyn, J. Mirosławski, A.P. Silva, D.G. Pinto, M. Miros: „*Oxide inclusions in steel Welds of car body*” Materials Science Forum Vols. 636-637 (2010), page: 585-591.
- [105] Węgrzyn T., Szopa R., Miros M.: „*Non metallic inclusions in the weld metal deposit of shielded electrodes used for welding of low carbon and low alloy steel*”, Welding International Vol 23, Issue 1, January 2009, page: 54-59.
- [106] Mazur M.: „*Podstawy spawalnictwa*”, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1991.
- [107] Węgrzyn T.: „*Tlen i Azot w stopiwi niskowęglowych zasadowych elektrod*”, Przegląd Spawalnictwa 6, 1992,
- [108] Węgrzyn T.: „*Zależność pomiędzy udarnością a zawartością manganu, niklu, molibdenu i azotu w stopiwi zasadowych elektro niskostopowych*”, Przegląd Spawalnictwa 11-12, 1996,
- [109] Węgrzyn T.: „*Próba klasyfikacji stalowych stopiw i łukowych metod spawania według stężenia tlenu w stopiwi*”, Przegląd Spawalnictwa 5, 1998,
- [110] Adamiec P., Dziubiński J.: „*Pęknięcia wodorowe w stalowych rurach spawanych*”, Przegląd Spawalnictwa 4, 2000.

- [111] Dziubiński J., Adamiec P.: „*Pęknięcie wodorowe stali rurowych w warunkach korozji naprężeniowej*”, Przegląd Spawalnictwa 5, 2000.
- [112] Dziubiński J., Adamiec P.: „*Wpływ wodoru i naprężeń rozciągających na właściwości rur spawanych spiralnie*”, Przegląd Spawalnictwa 6, 2000.
- [113] Adamiec P., Dziubiński J.: „*Ocena pęknięć wywołanych wodorem*”, Przegląd Spawalnictwa 7-8, 2000.
- [114] Cochrane R.C.: „*Weld Metal Microstructure*”, Weld In the World Vol. 12, 1993.
- [115] Wegrzyn T.: „*Oxygen and nitrogen in low carbon basic electrode weld metal deposits*”, dokument MIS: IW-Doc.IIA-1181-92, 1992.
- [116] Śledziwski E.: „*Konstrukcje spawane*”, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1974.
- [117] Sobczykiewicz W.: „*Stale o wysokiej wytrzymałości w spawanych konstrukcjach nośnych- aspekt zmęczeniowy*” Przegląd Mechaniczny 1, 2002.
- [118] Wichtowski B.: „*Pęknięcia zmęczeniowe spoin pachwinowych w podstawie słupa żurawia obrotowego*”, Inżynieria i Budownictwo 8, 2003.
- [119] Niebuhr D.V.: „*Mettalurgical Failure Analyses of horse trailer: A cryminal investigation*”, Journal of Failure Analyses and Preventions 6(4), 2006.
- [120] Katalog produktów firmy ESAB pobrany z :
<http://products.esab.com/Templates/T008.asp?id=61444.pdf>, data dostępu 18.12.2009
- [121] Informacje na stronie:
http://www.airproducts.com.pl/cylindergases/gazy_sprezone/welding/linx_ferrolinx.htm
data dostępu .12.2009.
- [122] Informacje zawarte na stronie internetowej:
www.bgw.com.pl/content.php?mod=gal_show&page=0&lang=pl&dzial=1, data dostępu 12.06.2008.
- [123] Dokument SCANIA 11:01-02: „*Prostowanie Ramy podwozia- wydanie II pl*” Scania CVAB 2003.
- [124] „*Prostowanie odkształconych nadwozi i ram*”: Auto Expert 70, 1, 2002,
- [125] Arczyński S.: „*Mechanika Ruchu Samochodu*”, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 1993.
- [126] Instrukcja obsługi naczepy samowyładowczej, wydana przez Zakład Budowy i Remontu Naczep „*BODEX*”, Szczerców 2008.

- [127] Węgrzyn T., Miros M., Hadryś D.: „*Optimization of Operational properties of steel welded structures*”, Maintenance and Reliability 3 (35)/ 2007.
- [128] Węgrzyn T.: „*The influence of the main factors on the impact toughness properties of low carbon steel welds*”, Konferencja ISOPE'97, maj 97 Honolulu, USA.
- [129] Węgrzyn T.: „*Galaxite and other oxide inclusions in basic electrode weld deposits*”, Międzynarodowa Konferencja OMAE, Lisbona 1998.
- [130] Węgrzyn T.: „*The classification of weld metal deposits in terms of the amount of nitrogen*”, The Proceedings of ISOPE'2000, V4: 130-134, Seattle, USA, 2000.
- [131] Węgrzyn T.: „*Oxygen and nitrogen in SMAW and GMAW processes*”, International Conference of Society of Offshore and Polar Engineers, Los Angeles 1996.
- [132] Węgrzyn T.: „*Oxygen and nitrogen in low carbon basic electrode weld metal deposits*”, Dokument IIW-Commission II :Arc Welding, Sub-Commission II A:The Metallurgy of weld metal,1992, Doc.II-A-1181-92.
- [133] Węgrzyn T., Miros M., Hadryś D.: „*Spawanie powypadkowych ram samochodów ciężarowych elektrodami otulonymi z dodatkiem molibdenu*” – Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Transport z. 64, Gliwice 2008.

Załącznik 1- Spis rysunków

Nr rys.	Opis rysunku
1	Sprzedaż nowych pojazdów ciężarowych
2	Import używanych pojazdów ciężarowych
3	Próba przeprowadzona zgodnie z ECE R 66
4	Budowa ramy podłużnicowej
5	Typowe połączenia poprzeczek i podłużnic w ramach nośnych pojazdów ciężarowych
6	Rama wywrotu samochodu o ładowności 4,5 t
7	Pojazdy z zabudowanymi ramami podkontenerowymi : a) z hakowym urządzeniem samozaładowczym, b) bez urządzenia samozaładowczego
8	Pojazdy z zabudowanymi żurawiami : a) żuraw zabudowany za tylną ośią jezdnią pojazdu, b) żuraw zabudowany za kabiną kierowcy
9	Obciążenie ramy pojazdu ciężarowego, obciążenie statyczne działające na ramę oraz schemat obliczeniowy
10	Przykładowe przebiegi momentów gnących pochodzących od sił statycznych
11	Model geometryczny ramy pojazdu ciężarowego
12	Warstwice naprężeń zredukowanych wg. hipotezy Hubera – Misesa
13	Zmiany wartości naprężeń zarejestrowane na elementach ramy pojazdu ciężarowego a- pomiar pomiędzy pierwszą a drugą poprzeczką ramy, b- pomiar pomiędzy wspornikami przedniego resoru
14	Sposób zwiększenia długości ramy nośnej 1- podłużnica ramy samochodu, 2- odcinek przedłużenia ramy, 3- węzłówka lub kątownik wzmacniający, 4- poprzeczka tylna
15	Rozkład naprężeń w miejscu występowania złącza spawanego w ramie nośnej pojazdu ciężarowego
16	Zalecenia producenta naczep samochodowych odnośnie ich rozładunku
17	Odkształcenie ramy nośnej pojazdu ciężarowego na skutek działania sił o charakterze statycznym
18	Uszkodzona naczepa samochodowa a- przed i b- po naprawie elementów
19	Schemat czynności związanych z naprawą uszkodzonej części, decyzja pozytywna (<i>T</i>) lub negatywna (<i>N</i>)
20	Wymagane informacje przy naprawie uszkodzonej części za pomocą spawania

21	Sposób przygotowania krawędzi łączonych elementów ram za pomocą spawania elementów
22	Przykład naprawy pęknięcia ramy a) za pomocą spoin otworowych elektrodami otulonymi; b) wzmocnienia spawanego MAG
23	Wzmocnienie naprawianego miejsca przez spawanie: a) wkładki, b) nakładki
24	Sposób wykonania oraz wzmocnienia łączenia podłużnic po procesie modyfikacji
25	Naprawa pęknięcia podłużnicy a) spawanie pęknięcia, b) nakładka wzmacniająca, c) wstawianie wstawki
26	Krzywa chłodzenia stopiwa elektrodowego a- ciecz, b- krystalizacja ziaren austenitu z zaznaczonymi wtrąceniami niemetalicznymi, c-ziarna austenitu z zaznaczonymi wtrąceniami niemetalicznymi, d, e- ferryt GBF, f- ferryt GBF oraz ferryt SPF, g- ferryt GBF, SPF oraz AF
27	Relacje pomiędzy granicą plastyczności R_e a wytrzymałością zmęczeniową złączy spawanych
28	Informacje dotyczące kryterium wodorowego (<i>kolor zielony - właściwości poznane</i>)
29	Informacje dotyczące kryterium wodorowego (<i>kolor czerwony – brak informacji, kolor zielony - właściwości poznane</i>)
30	Schemat badań wstępnych
31	Schemat badań zasadniczych
32	Średnie średnice wtrąceń niemetalicznych ujawnionych w stopiwie wykonanym otuloną elektrodą zasadową (<i>metoda niskotlenowa</i>)
33	Średnie średnice wtrąceń niemetalicznych ujawnionych w stopiwie wykonanym TIG (<i>metoda niskotlenowa</i>)
34	Średnie średnice wtrąceń niemetalicznych ujawnionych w stopiwie wykonanym metodą MAG (<i>metoda średniotlenowa</i>)
35	Średnie średnice wtrąceń niemetalicznych ujawnionych w stopiwie wykonanym otuloną elektrodą rutyłową (<i>metoda średniotlenowa</i>)
36	Średnie średnice wtrąceń w stopiwie o zawartości tlenu 345 PPM, laboratoryjne elektrody zasadowe (<i>5% Fe-Si, 2% Al, 1% Mg oraz 1% Ti w otulinie</i>)
37	Średnie średnice wtrąceń w stopiwie o zawartości tlenu 802 ppm, laboratoryjne elektrody rutyłowe (<i>35% TiO₂, 15% Fe₃O₄ oraz 3% Fe-Si w otulinie</i>)
38	Wtrącenie niemetaliczne o średnicy 16,5 μm ujawnione w stopiwie zawierającym 802 ppm tlenu
39	Mikroanaliza rentgenowska wtrącenia niemetalicznego w stopiwie wykonanym elektrodami ER 3.46
40	Mikroanaliza rentgenowska wtrącenia niemetalicznego w stopiwie wykonanym elektrodami EB 1.50
41	Mikroanaliza rentgenowska wtrącenia niemetalicznego w stopiwie wykonanym metodą MAG
42	Mikroanaliza rentgenowska wtrącenia niemetalicznego w stopiwie wykonanym metodą TIG
43	a- Wtrącenie o średnicy 0,402 μm , ujawnione w stopiwie elektrod zasadowych, b- udział danych średnic wtrąceń

44	a- wtrącenie o średnicy 9,08 μm , ujawnione w stopiwie elektrod rutytowych, b- udział danej wielkości wtrąceń
45	Aproksymowana funkcja wraz z punktami empirycznymi
46	Struktury metalograficzne stopiw wykonanych różnymi otulonymi elektrodami rutyłowymi: a- ER 1.42, b- 1.46, c-ER 3.46
47	Struktura metalograficzna stopiwa wykonanego a) elektrodą EB 1.50, b) elektrodą z dodatkiem 0,4% molibdenu, c) elektrodą z dodatkiem 1% niklu, temp. łamania -40°C , pow. x200
48	Struktura metalograficzna 200x stopiwa wykonanego metodą a) MAG, b) TIG
49	Wpływ zawartości tlenu (N_O) na udział ferrytu drobnoziarnistego (N_AF)
50	Sposób przygotowania badanego stopiwa oraz pobrania próbki
51	Próbka udarnościowa stopiwa z uwidocznionymi charakterystycznymi strefami złącza spawalnego: 1- Materiał rodzimy, 2- Strefa wpływu ciepła, 3- Stopiwo
52	Energia łamania stopiw wykonanych rutyłowymi elektrodami otulonymi
53	Energia łamania stopiw
54	Energia łamania stopiw o różnej zawartości tlenu
55	Sposób pomiaru odkształcenia próbek
56	Energia łamania stopiw nieodkształconych, odkształconych statycznie oraz dynamicznie temperatura próby $+20^{\circ}\text{C}$
57	Procentowy spadek energii łamania stopiw w stosunku do pracy łamania stopiwa nieodkształconego, temp. $+20^{\circ}\text{C}$
58	Sposób pobrania stopiwa do wykonania próbki wytrzymałościowej wynikający z normy PN EN 87/M 69772
59	Wymiary próbek używanych do badań zgodne z norma EN 10002-1:1990
60	Wykres rozciągania stopiwa wykonanego zasadowymi elektrodami otulonymi
61	Wykres rozciągania stopiw wykonanych metodą MAG
62	Wykres rozciągania stopiw wykonanych otuloną elektrodą rutyłową
63	Wykres rozciągania stopiwa wykonanego metodą MIG
64	Wartości R_e oraz R_m badanych stopiw
65	Wymiary oraz kształt próbek używanych do badań zmęczeniowych
66	Wykres wytrzymałości zmęczeniowej Wöhlera dla stopiwa wykonanego elektrodami zasadowymi

67	Wykres wytrzymałości zmęczeniowej Wöhlera dla stopiwa wykonanego metodą MAG
68	Wykres wytrzymałości zmęczeniowej Wöhlera dla stopiwa wykonanego metodą MIG
69	Wykres wytrzymałości zmęczeniowej Wöhlera dla stopiwa wykonanego elektrodami rutyłowymi
70	Wytrzymałość zmęczeniowa stopiw wykonanych badanymi metodami
71	Siły i reakcje występujące w rozpatrywanym przypadku obciążenia ramy nośnej
72	Momenty gnące w podłużnicy ramy nośnej naczepy samowyładowczej
73	Naczepa samowyładowcza BODEX oraz jej model geometryczny
74	Model dyskretny naczepy samowyładowczej marki BODEX
75	Siatka modelu dyskretnego tylnej części ramy naczepy samowyładowczej
76	Schemat obciążenia ramy nośnej naczepy dla pierwszego analizowanego przypadku
77	Wielkości przemieszczeń poszczególnych części ramy nośnej naczepy BODEX w warunkach jej postoju na płaskiej powierzchni
78	Warstwice naprężeń zredukowanych ramy nośnej naczepy BODEX w miejscu gdzie osiągały one największą wartość
79	Schemat obciążenia ramy nośnej naczepy dla drugiego analizowanego przypadku
80	Wielkości przemieszczeń poszczególnych części ramy nośnej naczepy BODEX w warunkach jej rozładunku
81	Warstwice naprężeń zredukowanych ramy nośnej naczepy BODEX w miejscu gdzie osiągały one największą wartość w warunkach jej rozładunku
82	Miejsce naklejenia tensometrów
83	Przebieg naprężeń w podłużnicach naczepy podczas testu układu pomiarowego
84	Naprężenia w podłużnicach podczas jazdy nieobciążonej naczepy po nawierzchni asfaltowej z prędkością około 50 km/h
85	Naprężenia na podłużnicach naczepy podczas rozładunku nieobciążonej naczepy (<i>podnoszenie skrzyni ładunkowej</i>)
86	Skrajne położenie skrzyni ładunkowej w czasie pomiaru naprężeń
87	Naprężenia w podłużnicach podczas jazdy częściowo obciążonej naczepy po nawierzchni asfaltowej z prędkością około 50 km/h
88	Naprężenia na podłużnicach naczepy podczas rozładunku (<i>podnoszenie skrzyni ładunkowej zawierającej 15000 kg piasku</i>)
89	Naprężenia na podłużnicach naczepy podczas rozładunku (<i>podnoszenie obciążonej skrzyni ładunkowej</i>) oraz wytrzymałość złączy spawanych

Załącznik 2- Spis tablic

Nr tablicy	Tytuł tablicy
1	Wykaz jednostek, oznaczeń i skrótów
2	Typy kolizji i częstotliwość ich występowania
3	Skład chemiczny i właściwości stali S355J2G3
4	Zestawienie najczęściej stosowanych metod naprawy
5	Parametry spawania oraz gatunki użytych materiałów dodatkowych
6	Podział metod spawalniczych ze względu na zawartość tlenu w ich stopiwie
7	Zawartość tlenu w stopiwie elektrod rutytowych zawierających w otulinie zmienne wagowe ilości ważniejszych składników
8	Zawartość tlenu w stopiwie elektrod zasadowych zawierających w otulinie zmienne wagowe ilości ważniejszych składników
9	Zawartość tlenu w badanych stopiwach
10	Udziały procentowe odmian ferrytu w stopiwie elektrod rutytowych
11	Udziały procentowe drobnoziarnistego ferrytu w stopiwie elektrod zasadowych
12	Udziały procentowe drobnoziarnistego ferrytu w stopiwach wykonanych metodami MAG i TIG
13	Stężenie tlenu w badanych stopiwach
14	Wartości R_m oraz R_e dla badanych stopiw
15	Obliczenia wartości naprężeń w podłużnicy

STRESZCZENIE

Badania przeprowadzone podczas realizacji pracy doktorskiej podzielić można było na dwie grupy- badania wstępne oraz badania zasadnicze. Pierwszą grupę stanowiły badania o charakterze metalograficznym- były to badania wstępne. Badania te miały na celu ustalenie w badanym obszarze metod spawalniczych związku pomiędzy zawartością tlenu w stopiwiu a udziałami najkorzystniejszej pod względem własności plastycznych i wytrzymałościowych fazy- ferrytu drobnoziarnistego (*ferrytu AF wg. MIS.*). Badaniom wstępnym poddano metody spawania zalecane przez producentów pojazdów ciężarowych do spawania elementów ram nośnych oraz metodę TIG. Dodatkowo w celu przeanalizowania wpływu tlenu na formowanie drobnoziarnistego ferrytu AF przeanalizowano stopiwa wykonane otulonymi elektrodami wykonanymi w warunkach laboratoryjnych. Badaniami wstępnymi objęto stopiwa wykonane metodami: elektrodami otulonymi z zastosowaniem otuliny o charakterze zasadowym oraz rutyłowymi, metodę MAG, metodę TIG, elektrodami otulonymi z zastosowaniem otuliny wyprodukowanej w warunkach laboratoryjnych. Badany obszar metod spawalniczych reprezentowany był przez metody średnio oraz nisko- tlenowe zgodnie z istniejącym tzw. kryterium tlenowym. W badaniach wstępnych przeanalizowano wielkości i skład chemiczny ujawnionych wtrąceń niemetalicznych. Podsumowaniem tej części badań było wyprowadzenie wzoru wiążącego zawartość tlenu w stopiwiu oraz wielkość wtrąceń niemetalicznych występujących w stopiwiu. Przeanalizowano struktury metalograficzne stopiw pod względem zawartości odmian polimorficznych ferrytu (*GBF, SPF oraz AF*) tworzącego strukturę metalograficzną. Wyprowadzono wzór wiążący zawartość tlenu w stopiwiu oraz procentowy udział drobnoziarnistego ferrytu AF.

Badania zasadnicze prowadzone były w celu określenia przydatności stopiw wykonanych metodami niskotlenowymi (*o dużej zawartości ferrytu AF w stopiwiu*) do napraw oraz przebudów ram pojazdów ciężarowych. Złącza spawane znajdujące się w ramie nośnej pojazdu ciężarowego narażone są na występowanie naprężeń o różnym charakterze oraz wielkościach. Terenowe warunki pracy pojazdów obsługujących np. budowy generują powstawianie naprężeń dynamicznych o charakterze udarów. Spawane podłużnice ramy naczepy samochodowej narażone są na występowanie znacznych naprężeń pochodzących od rozciągania. Niemalże w każdych warunkach ruchowych na ramę pojazdu ciężarowego działają stosunkowo niewielkie siły- jednak powtarzające się w czasie. Siły oraz wynikające z nich naprężenia mogą powodować powstawanie pęknięć zmęczeniowych. Z literatury wynikało, iż duże udziały drobnoziarnistego ferrytu AF wchodzącego w skład struktury metalograficznej stopi-

wa powodują, iż stopiwo takie charakteryzuje się dobrymi właściwościami plastycznymi (*udarnościami*) - zostało to również potwierdzone w przeprowadzonych badaniach. Badania energii łamania stopiw prowadzono w dwóch temperaturach $+20^{\circ}\text{C}$ oraz -40°C również dla stopiw wykonanych z użyciem materiałów dodatkowych wykonanych metodami laboratoryjnymi. Kolejnym badaniem o charakterze eksploatacyjnym było badanie udarności stopiw wstępnie odkształconych oraz wyprostowanych. Taki sposób przygotowania próbek miał symulować złącze spawane znajdujące się w odkształconej plastycznie ramie pojazdu ciężarowego po naprawie polegającej na statycznym prostowaniu. Próbki stopiw odkształcano obciążeniem statycznym oraz dynamicznym- miało to symulować różne sposoby odkształcenia ramy pojazdu ciężarowego. Badania udarności zarówno stopiw nieodkształconych jak i odkształconych wstępnie wykazały, iż wyższymi energiami łamania charakteryzowały się stopiwa wykonane metodami niskotlenowymi.

Przeanalizowano własności wytrzymałościowe stopiw wykonanych badanymi metodami o różnej zawartości tlenu. Jak wynikało z uzyskanych wyników poza najlepszą udarnością również i najlepszą wytrzymałością na rozciąganie charakteryzowało się stopiwo o największej zawartości drobnoziarnistego ferrytu AF- stopiwo wykonane otulonymi elektrodami zasadowymi.

Kolejnym etapem badań zasadniczych były badania wytrzymałości zmęczeniowej stopiw o różnej zawartości tlenu. Przeprowadzone badania uwidoczniły również i tym przypadku przewagę właściwości stopiw wykonanych metodami niskotlenowymi nad właściwościami stopiw metod średniotlenowych.

Dodatkowo, aby możliwa była ocena uzyskanych wyników przeprowadzonych badań w odniesieniu do rzeczywistych warunków eksploatacyjnych przeprowadzono pomiar rzeczywistych naprężeń występujących w spawanej ramie pojazdu ciężarowego w pewnych, typowych warunkach eksploatacji.

Badania te rozpoczęto od przeprowadzenia numerycznej analizy modelu ramy naczepy samowładowczej z użyciem programu wykorzystującego metodę MES. Aby zweryfikować uzyskana wartość naprężeń we wskazanym przez program wykorzystujący metodę MES miejscu, w tym właśnie miejscu naklejone zostały tensometry oraz przeprowadzony został pomiar naprężeń w rzeczywistych warunkach. Uzyskane podczas tych badań wyniki odniesiono do wyników badań wytrzymałości doraźnej.

SUMMARY

The investigations in my PhD thesis could be divided into two groups: preliminary investigations and principal investigations. Investigations of the first group consisted of, metallographic investigation. The aim of these investigations was to determine the relationship between content of oxygen in weld metal deposit with are most profitable from plastic properties phase - acicular ferrite (*ferrite AF according to. MIS.*) Method of welding recommended by manufacturers for trucks to welding the elements of bearing frames and the TIG method were tested in preliminary investigation. Additionally in order to analyse the influence of oxygen on forming acicular ferrite in weld metal deposit, the coated electrodes prepared in laboratory conditions were analysed. In preliminary investigations weld metals deposits prepared by the following methods: the coated electrodes with the use of basic electrodes, rutile electrodes, and electrodes produced in laboratory conditions, MAG method, TIG method were tested. The studied area of welding methods was represented by average and low-oxygenic methods according to the existing oxygenic criterion. In preliminary investigations the size and chemical composition of non metallic inclusions were analysed. The recapitulation of this part of investigations was to make a formula binding the content of oxygen in weld metal deposit with the size of non metallic inclusions seen in WMD. The metallographic structures of WMD were analysed as far as to content of polymorphic changes of ferrite (*GBF, SPF and AF*) this three changes creates the metallographic structure of WMD. The formula binding the content of oxygen with amount of acicular ferrite was made.

The principal investigations of weld metals deposits were carried out in order to state usefulness of the low oxygen methods (*large content of ferrite the AF in WMD*) to repair and reconstructions trucks frames. Welded joints in bearing frame were exposed to tensions of different character and values. The field conditions of vehicle used on the building site, generate the dynamic tensions like strokes. The welded elements of frame in semitrailer car are subject to the considerable from expansion tensions. In every movement conditions truck frame are exposed to comparatively small forces - however repeating in time. Forces as well tensions can cause the formation of fatigue cracks. It had been proved that large parts of fine-grained ferrite the existing in metallographic structure of weld metal deposit cause WMD to have good plastic properties (*toughness*) – it was also confirmed in conducted investigations. The investigation of smashing energy was carried out in two temperatures + 20°C and -40°C, investigations were also conducted for WMD prepared with additional materials which were obtained by laboratory methods.

The next step of investigations of exploational character was the investigation of toughness od WMD initially deformed and straightened out. Such a way of preparing samples was to simulate welded joint in plastically deformed frame of truck after straightening. The samples were deformed by static and dynamic burden - this had to simulate the different ways of deformation of trucks frame. Investigation of toughnees showed that weld metals deposit of low oxigen welding methods characterized higher smashing energies.

The stamina property of weld metals deposits with different content of oxygen were analysed. As resulted showed obtained apart from higher smashing energy the WMD with the largest content of fine-grained ferrite (*WMD made witch coated basic electrodes- low oxigen method*) had better expansion endurance.

The next step of principal investigations were the fatigue investigations of weld metal deposits with different content of oxygen. The conducted investigations also demonstrated the superiority of metal weld deposit proprieties obtained by low oxygen welding methods over proprieties of WMDmade with midium oxygen welding methods.

Additionally in order to compare their results to real exploational conditions measurement of real tensions were conducted. These investigations started with execution of numeric analysis of frame model of a self - dumping semitrailer. To verify value of tensions in indicated by FEM programme, deformeters were stuck in places shown by programme FEM and the measurement of tensions was conducted in real conditions. The results of these investigations were compared with the results of investigations of temporary endurance results.