

POLITECHNIKA OPOLSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

**Trwałość połączeń spawanych wykonanych ze stali o
podwyższonej wytrzymałości – S690QL do S1100QL**

STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Fabian Żok

Promotor: prof. dr hab. inż. Tadeusz Łagoda

Promotor pomocniczy: Dr inż. Mateusz Kowalski

Wprowadzenie

Trwałość maszyn i konstrukcji jest zagadnieniem złożonym i występującym w technice od początku tworzenia urządzeń. Wraz z rozwojem nowych materiałów konstrukcyjnych pojawiają się zagadnienia związane z sprawdzeniem trwałości nowych materiałów w odniesieniu do dotychczas znanych. Stale o podwyższonej granicy plastyczności tylko częściowo są rozpoznane po kątem wytrzymałości zmęczeniowej połączeń spawanych.

Drobnoziarniste stale o podwyższonej granicy wytrzymałości pozwalają na znaczne obniżenie masy gotowej konstrukcji przy zachowaniu tego samego poziomu wytrzymałości. Przykładowe stosując stal S1100 w miejsce S355 można zaoszczędzić ok 60% materiału. Koszty procesów technologicznych również spadają z uwagi na mniejszą ilość materiału do obróbki. Rzutuje to na całokształt koszt konstrukcji który może być niższy mimo wyższej ceny materiału podstawowego.

Znaczną wadą stosowania stali o podwyższonej granicy plastyczności jest brak możliwości przeprowadzenia odprężającej obróbki cieplnej oraz ograniczenia parku maszyn.

Wzrost wymagań bezpieczeństwa konstrukcji powoduje konieczność poszerzenia wiedzy o zjawiskach i mechanizmach wpływających na trwałość eksploatacyjną nowych gatunków stali. Stawiane są coraz wyższe wymagania dla materiałów podstawowych i to wymusza szczegółowe poznanie mechanizmów powodujących obniżenie trwałości a w ekstremalnych przypadkach prowadzących do zniszczenia.

Poprzez właściwy proces produkcyjny można uzyskać stal o skrajnie różnych właściwościach wytrzymałościowych. Składają się na to proces walcowania, grzania i chłodzenia. Będzie to miało bezpośrednie odzworowanie na strukturze metalograficznej oraz właściwościach wyrobu.

Martensyt to przesycony roztwór węgla w żelazie α , powstały z austenitu (faza γ) przechłodzonego do temperatury uniemożliwiającej dyfuzję węgla. Charakteryzuje się wysoką twardością i kruchością. Temperatury rozpoczęcia i zakończenia przemiany fazowej uzależnione są od składu chemicznego i obniżają się wraz z wzrostem zawartości węgla i pierwiastków stopowych w składzie. Z wyjątkiem glinu Al i kobaltu Co które zwiększają temperaturę M_s .

Wymagania stawiane złączom spawanym

Złącza stalowe wykonane metodą spawania łukowego na poprawność technologiczną i możliwość wykorzystania w przemyśle bada się w oparciu o normę PN EN ISO 15614-1. Wykonaną płytę próbną poddaje się kolejno badaniom powierzchniowym – badania wizualne, penetracyjne lub magnetyczno-proszkowe, w następnej kolejności wykonuje się badania objętościowe – radiograficzne

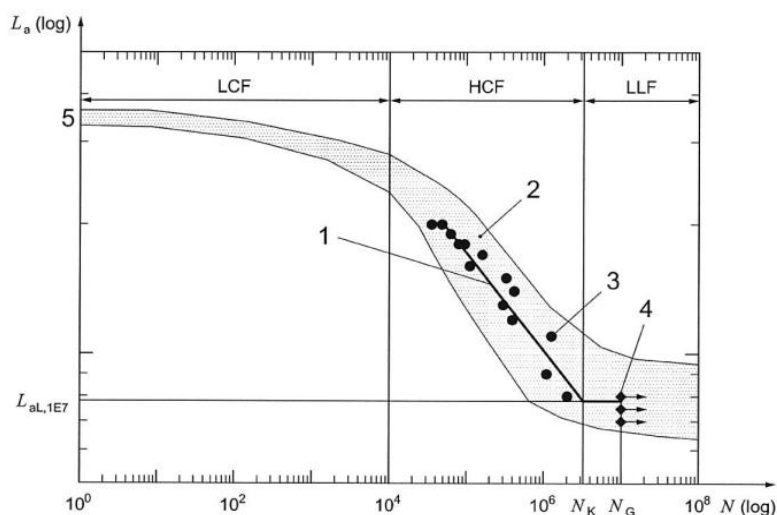
lub ultradźwiękowe. W zależności od gatunku i gabarytów zastosowanych materiałów dobiera się właściwe metody badawcze. Po badaniach nieniszczących wykonuje się próbę poprzecznego rozciągania złącza, udarność, gięcia, zgląd makro oraz pomiar twardości. Jeśli wyniki wszystkich przeprowadzonych prób są pozytywne można uznać daną technologię wytworzenia złącza za pozytywną. Po zatwierdzeniu wszystkich wyników przez niezależną stronę trzecią, technologia może być użyta w produkcji. Co do zasady przyjmuje się, że materiały spawane muszą wykazywać co najmniej taką wytrzymałością jak materiał rodzimy wykorzystany do spawania złącza.

W przemyśle stosowane są ujednoczone normy i przepisy ułatwiające proces projektowy oraz porównywanie wyników badań zmęczeniowych. W krajach anglosaskich w znacznej mierze bazuje się na przepisach ASTM jak np. E466 i E468 a także przepisy budowlane ANSI/AISC 360. W Europie stosowana jest norma DIN 50100, ISO 1099 a także zbiór wytycznych projektowych Eurokody.

Zjawisko zmęczenia, przegląd literatury

Wykres Wöhlera jest najstarszym i nadal jednym z podstawowych narzędzi oceny trwałości zmęczeniowej. Wykres uzyskuje się poprzez przebadanie próbek wzorcowych przy różnym poziomie obciążenia. Szczegółowo zostało to przedstawione w normie DIN 50100. Wykres wyznacza się z zależności:

Za stosowaniem wykresów naprężeniowych przemawia duża ilość dostępnych charakterystyk dla różnych materiałów oraz prostota odczytu.



Rysunek 1 Schematyczna charakterystyka Wöhlera

Na rysunku powyżej (Rys. 1) przedstawiono schematycznie obszary trwałości (LCF, HCF, LLF), wyniki badań eksperymentalnych a także obszar rozproszenia wyników. Na tej podstawie wyznaczona zostaje krzywa S-N.

Wykresy odkształceniowe bazują na pomiarach amplitudy odkształcenia. Basquin a później Manson, Coffin stwierdzili, że występuje zależność pomiędzy odkształceniem a liczbą półcykli. Można to wyrazić za pomocą modelu Mansona-Coffina-Basquina.

Normy materiałowe czy badawcze z pewnym opóźnieniem publikują wyniki badań i bazujące na nich wytyczne. W znanych normach związanych z badaniami zmęczeniowymi jest mowa o stalach konstrukcyjnych o „standardowych” parametrach wytrzymałościowych – tj. granicy plastyczności nie przekraczającej 700 MPa i typowej drobnoziarnistej strukturze. Stale o podwyższonych wytrzymałościach, przekraczających 700 MPa w znacznej mierze nie są uwzględnione w wytycznych projektowych jak np. Eurocode. Z uwagi na specyfikę tych materiałów wraz z ich wyższą wytrzymałością spada ilość dostępnych publikacji.

Z racji swoich parametrów wytrzymałościowych stale o podwyższonych wytrzymałościach są obiecującym materiałem dla wielu gałęzi przemysłu.

Wraz z wzrostem wytrzymałości trwałość zmęczeniowa nie ulega drastycznej poprawie. Żywotność tych stali jest na podobnym poziomie co stali drobnoziarnistych o „przeciętnych” granicach plastyczności 235 - 460 MPa. Materiały o granicy plastyczności powyżej 700 MPa cechuje spora niewrażliwość na prędkość odkształcenia.

W czasopiśmie naukowych liczba publikacji jest odwrotnie proporcjonalna do wytrzymałości badanej stali. Wraz z wzrostem granicy wytrzymałości spada liczba dostępnych publikacji. Widoczny jest wyraźny trend ku intensyfikacji badań stali o granicy plastyczności wyraźnie ponad 900 MPa.

Jednym z pierwszych polskich badaczy przedstawiających korzyści z stosowania nowoczesnych stali o podwyższonych wytrzymałościach był Węglowski. W swojej pracy charakteryzuje cechy wyróżniające tą grupę stali. Szczegółowo analizuje skład chemiczny i bazującą na niej spawalność. Przywołuje zalecenia producentów stali dla prawidłowego wykonania złączy, porównuje właściwości wytrzymałościowe w różnych temperaturach badania.

Klimpel i inni w swojej pracy przedstawiają wyniki badań wytrzymałościowych i strukturalnych na złączach wykonanych z stali w gatunku S690 i S960. Sugerują by uwzględniać energię liniową spawania określoną przez wytwórcę blach jako maksymalnie dopuszczalną.

Costa, Ferreira i Abreu w swojej pracy rozważają trwałość zmęczeniową spawanych złączy z stali o wysokiej wytrzymałości w odniesieniu do promienia linii wtopienia. Próbkę do badań zmęczeniowych badano w stanie jak po spawaniu. Poddano je cyklicznemu obciążeniu z sinusoidalnym charakterem obciążenia i częstotliwością 20 Hz oraz współczynnikiem asymetrii cyklu naprężenia $R=0$. Pomiar

twardości wykazał wyraźny spadek twardości w SWC, przy czym największe gradienty twardości zmierzono w rdzeniu próbki.

Goss, Marecki i Grzelak analizują w swej pracy trwałość zmęczeniową stali S960QL. Zmierzono poziom naprężeń własny metodą rentgenowską. Wykonane zostały złącza doczołowe, metodą 141/TIG/GTAW. Badanie zmęczeniowe prowadzono z stałym obciążeniem i zerową wartością średnią. Dowodzą, że próbki w stanie po spawaniu cechują się niższą trwałością niż materiał bazowy. Zauważono, że amplituda odkształcenia plastycznego szybko maleje, stabilizując się na stałym poziomie do zniszczenia próbki. Pomiary naprężeń własnych wykazały, że najwyższe naprężenie jest w spoinie oraz na granicy pomiędzy SWC a materiałem bazowym. Analiza metalograficzna wykazała, że miejsca inicjacji pęknięć wystąpiły w obszarze linii wtopienia jako kruche pęknięcia. Stwierdzono, że występuje znaczna ilość kruchych siarczków wpływających na pęknięcia zmęczeniowe, co objawia się występowaniem pęknięć od przełomu. Możliwe jest zwiększenie trwałości zmęczeniowej złącza spawanego poprzez wprowadzenie naprężeń ściskających w obszarze złącza, na przykład przez kulowanie.

Koncentracja naprężeń w narożu spoiny oraz wewnętrzne defekty w pobliżu naroża spoiny są głównymi czynnikami powodującymi spadek wytrzymałości zmęczeniowej. Usunięcie nadmiaru spoiny przez szlifowanie przyczynia się do znacznej poprawy wytrzymałości zmęczeniowej w porównaniu w porównaniu ze stanem po spawaniu. Można zatem stwierdzić, że koncentracja naprężeń w narożu spoiny oraz wewnętrzne defekty w pobliżu lica i grani spoiny są głównymi czynnikami powodującymi obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej.

Znajomość parametrów procesu spawania jest znacząca pod względem trwałości zmęczeniowej, wymagana jest skrupulatna dokumentacja i zgodność wykonania z instrukcją spawalniczą – WPS-em. Jakość spawania i kształt spoiny musi być powtarzalny dla osiągnięcia wysokiej liczby w zakresie LCF.

Każdy proces produkcyjny generuje naprężenia, które są kumulowane w obrabianym materiale. Występowanie lokalnych obszarów o znacznym gradiencie naprężeń własnych może powodować nieoczekiwane problemy.

Cel i zakres pracy

Celem pracy jest identyfikacja właściwości zmęczeniowych złączy spawanych wykonanych z wysokowytrzymałych – o granicy plastyczności przekraczającej 690 MPa, wykonanych przy różnych parametrach spawania a także porównanie wpływu parametrów i metod spawania na trwałość zmęczeniową jak również sprawdzenie poziomu naprężeń własnych wprowadzonych do materiału

wskutek procesu spawania. W ramach pracy prowadzono badania na materiałach zaliczanych do stali o podwyższonej wytrzymałości zawartych w normie PN EN 10025-6 i nie tylko.

Właściwości mechaniczne materiałów podstawowych

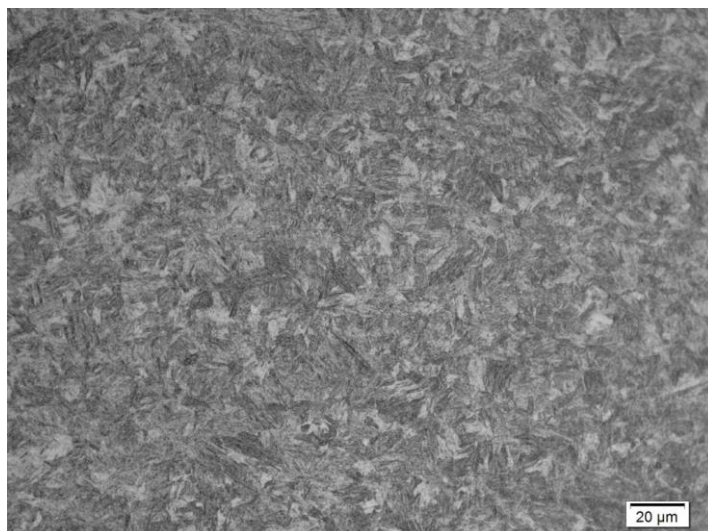
Użyte stale spełniały kryteria stawiane przez normę PN EN 10025-6 oraz wytyczne producenta. Jest to punkt wyjściowy do dalszej analizy zmian bądź degradacji wskutek procesu produkcyjnego. Należy zauważyć, że stale o granicach wytrzymałości 1100 MPa oraz 1300 MPa nie są ujęte w aktualnie obowiązującym wydaniu normy.

Użyte materiały spełniały wymogi stawiane przez normę materiałową lub wytyczne producenta. Zostały również sprawdzone i potwierdzone w badaniach własnych pod względem rozwarstwienia metodą ultradźwiękową i wytrzymałościowym (tabela 1). Sprawdzone również skład chemiczny – tabela 2.

Tabela 1. Wyniki badań wytrzymałościowych gatunku S1100

	Kierunek	Re MPa min. 1100			Rm MPa 1200 - 1500			A min. 8%			KV J min. 30			KV J	Temp. °C
Wyniki atest	Q	1157			1384			10			30	37	31	33	-40
		1185			1386			9			41	35	31		
Badania własne	Q	1279			1397			12			78	88	71	80	-40
											96	101	74		
		1252	1236	1350	1377	1380	1433	11,8	12,6	12,0	76	53	87		
Badania własne	L	1225			1346			11			58	62	67	56	-40
											63	53	48		
		1200	1225	1250	1357	1357	1323	11,5	11,4	11,6	58	62	32		

Wykonano również badania metalograficzne struktury blachy. Struktura materiału rodzimego stali S1100QL składa się głównie z martenzytu odpuszczonego i bainitu – widoczne na rysunku 2.



Rysunek 2. Struktura krystalograficzna blachy w gatunku S1100

Tabela 2. Skład chemiczny blachy S1100QL

	C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	N, %	B, %	Cr, %
Norma	max. 0,22	max. 0,86	max. 1,80	max. 0,025	max. 0,012	max. 0,016	max. 0,006	max. 1,60
Atest	0,17	0,23	1,12	0,011	0,001	0,0031	0,025	0,67
Badania własne 1	0,11	0,24	1,14	0,015	0,003	0,014	0,003	0,66
Badania własne 2	0,14	0,24	1,14	0,013	0,002	0,013	0,002	0,66
	Cu, %	Mo, %	Nb, %	Ni, %	Ti, %	V, %	Zr, %	Al, %
Norma	max. 0,55	max. 0,74	max. 0,07	max. 2,10	max. 0,07	max. 0,14	max. 0,17	min. 0,01
Atest	0,050	0,62	0,030	0,600	0,005	0,000	0,000	0,092
Badania własne 1	0,052	0,62	0,031	0,051	0,003	0,004	0,002	0,089
Badania własne 2	0,052	0,61	0,031	0,051	0,003	0,003	0,002	0,089

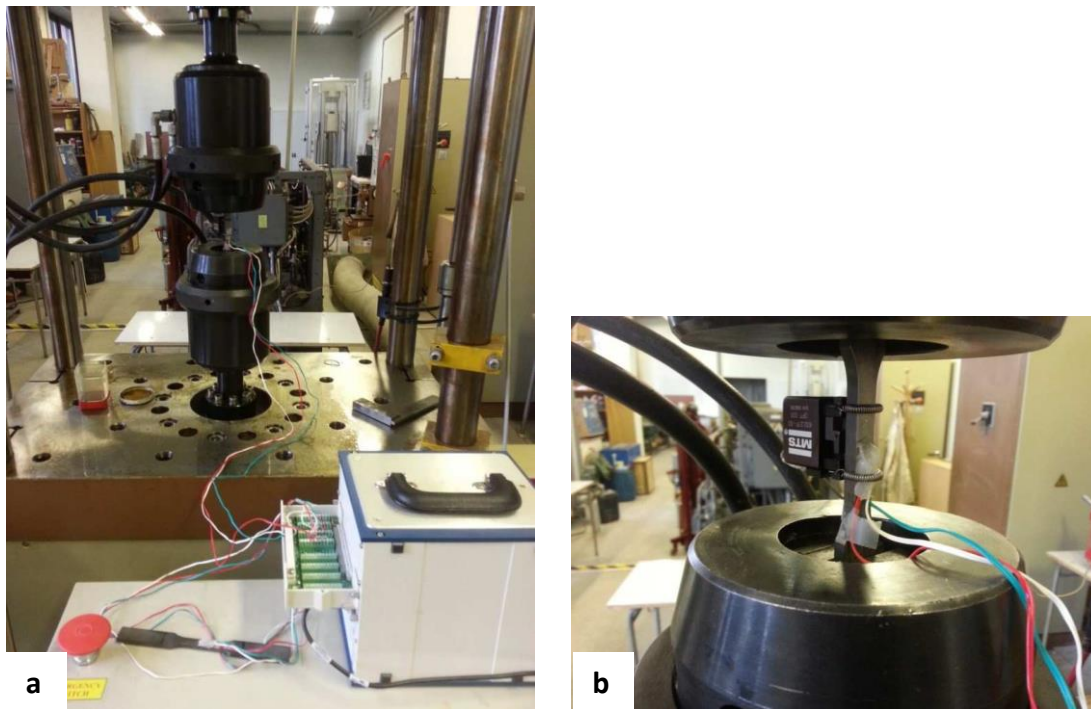
Właściwości mechaniczne złączy spawanych

Wykonano łącznie 128 złączy próbnych z gatunków S690, S890, S960 oraz S1100. Częściowo były to złącza doczołowe i pachwinowe wykonane metodami 135 i 111 przy różnych energiach liniowych częściowo z podgrzewaniem, częściowo bez. Złączy doczołowych wykonanych metodą 135 było 30 a metodą 111 łącznie 14. Z tych złączy do badań wytrzymałościowych wytypowano wszystkie, mimo iż niektóre nie spełniły wymogów dla badań nieniszczących.

Złącza spawane wykonane są ściśle według przygotowanej instrukcji spawalniczej pWPS zawierającej informacje odnośnie do postępowania dla prawidłowego wykonania złącza spawanego.

Badania zmęczeniowe

Testy cyklicznego i losowego rozciągania-ściskania wykonano przy pomocy hydraulicznej maszyny do badań zmęczeniowych SHM 250 (rysunek 3). Stanowisko wyposażone jest we wbudowane czujniki siły i przemieszczenia. Do pomiaru odkształceń wykorzystywano ekstensometr mocowany na próbce. Urządzenie jest sterowane poprzez oprogramowanie napisane w systemie Matlab/Simulink.



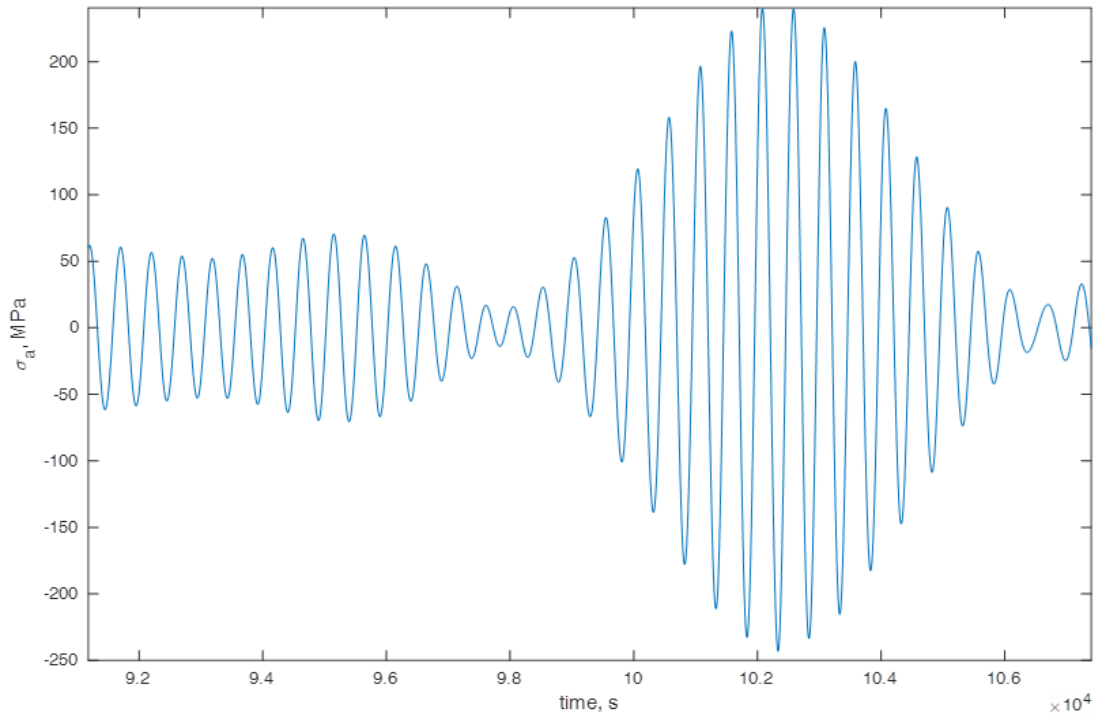
Rysunek 3. Struktura krystalograficzna blachy w gatunku S1100

We wszystkich przeprowadzonych testach zmęczeniowych zastosowano sterowanie siłą.

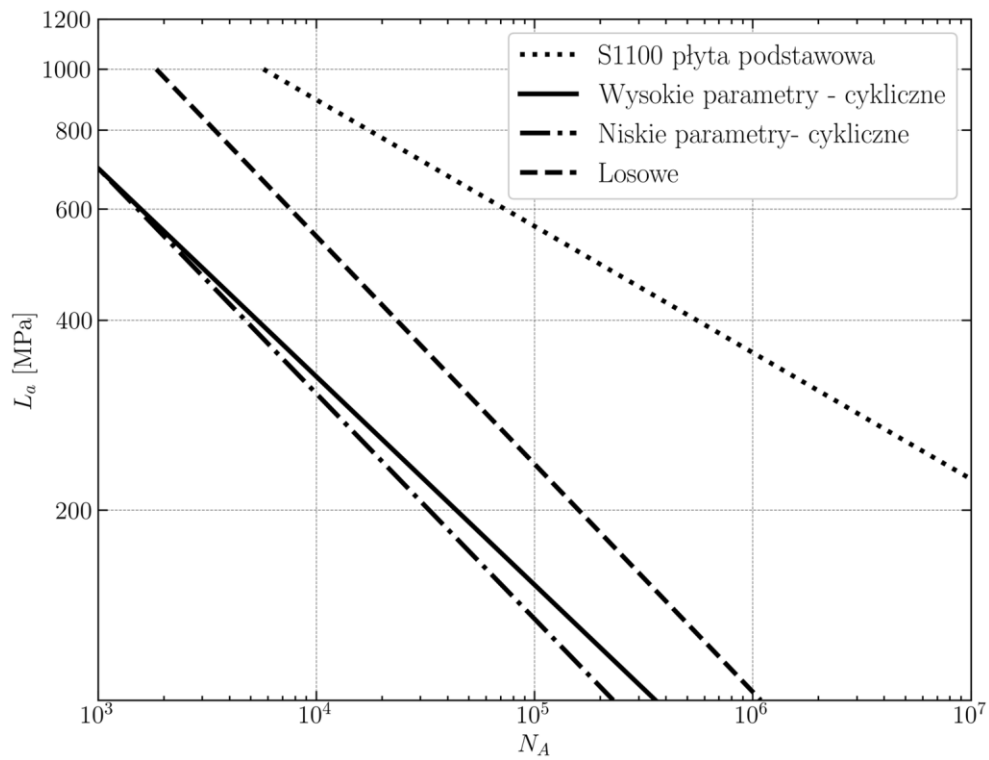
Z płyt przeznaczonych do badania zmęczeniowego wykonano próbki do badań o przekroju prostokątnym i nominalnym wymiarze 8 x 12 mm.

Do badań zmęczeniowych wytypowane zostały złącza wykonane z stali S1100 i spawane metodą 111/ MMA z uwagi na brak dostępnej literatury. Z każdej płyty w przygotowano 22 próbki. Test przeprowadzono przy obciążeniu cyklicznym i losowym. Badanie prowadzono do momentu zwiększenia się przemieszczenia o 40% wartości początkowej. Ponadto przeprowadzono badania zmęczeniowe z losowym obciążeniem według rozkładu gęstości widmowej mocy przedstawionej.

Badania zmęczeniowe z losowym obciążeniem przeprowadzono dla obciążeń według rozkładu gęstości widmowej mocy oraz współczynnika $m= 2,8$ i $N_0= 2 \cdot 10^6$ cykli. Przebieg losowy cyklu zmęczeniowego zaprezentowany został na rysunku 4. Wyniki prób zmęczeniowych przedstawione zostały na rysunku 5.



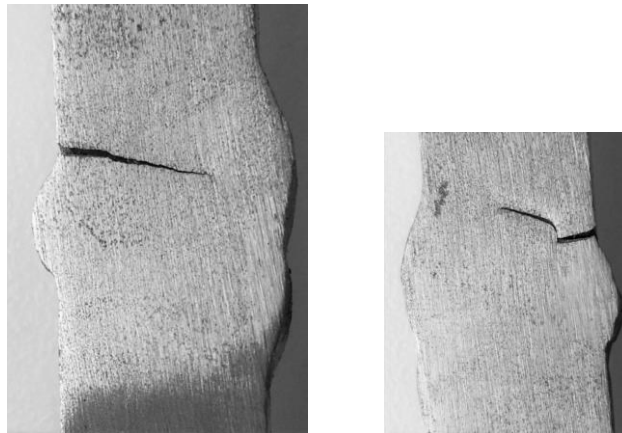
Rysunek 4 Przebieg losowy – badanie zmęczeniowe złącza z stali S1100QL



Rysunek 5 Zestawienie charakterystyk z obciążeniem cyklicznym i losowym.

Widoczne jest znaczne pogorszenie trwałości spoin w odniesieniu do trwałości materiału bazowego.

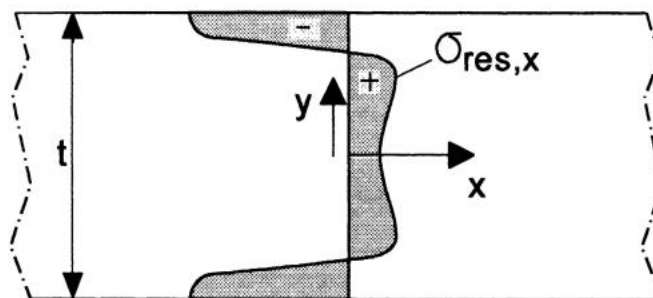
Proces propagacji pęknięcia w przypadku wszystkich próbek następował po stronie grani spoiny. Na trwałość zmęczeniową połączeń mogły wpływać wysokie wartości naprężeń własnych wewnątrz materiału. Na rysunkach 6 zaprezentowano przykładowe pęknięcia zmęczeniowe.



Rysunek 6. Przykładowe pęknięcia po badaniu próbek spawanych „wysokimi parametrami”, pow. 4x

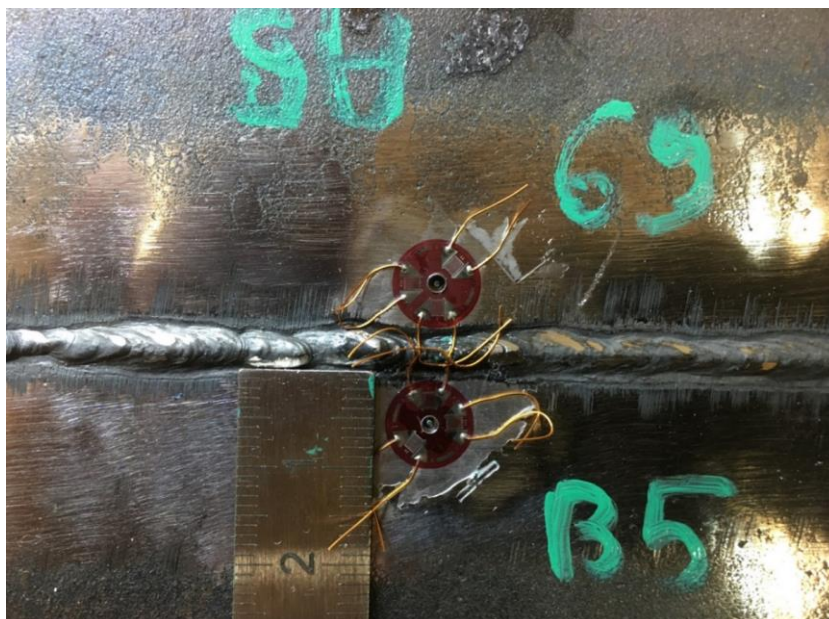
Badania naprężeń własnych

Naprężenia to z definicji stan fizyczny obiektu, w którym przyjmuje się, że rozkład naprężeń wewnętrznych w danym elemencie nie został wywołany poprzez obciążenia zewnętrzne. Zakłada się, że jeśli obiekt nie jest obciążony z zewnątrz suma naprężeń rozciągających powinna być niwelowana poprzez naprężenia ściskające. Schematycznie przedstawiono to na rys. 7.



Rysunek 7. Rozkład naprężeń szczątkowych w stanie równowagi [94]

Przykładowy pomiar metodą wiercenia ślepego otworu zaprezentowano na rysunku 8. Uzyskanie wiarygodnych wyników zależy w dużym stopniu od zastosowanych przyrządów pomiarowych oraz dokładności ustawiania wiertła względem środka otworu oznaczonego w rozecie tensometrycznej.



Rysunek 8. Wywiercone otwory pomiarowe przez rozetę tensometryczną

W prezentowanych badaniach wykorzystano: wiertarka pneumatyczna VPG RS200 oraz mostek tensometryczny P3. Ważną cechą wykorzystanej wiertarki jest możliwość bardzo dokładnego ustawienia wiertła, oraz uzyskania równych, co do wartości posuwów w głąb materiału. Przyjęte stałe materiałowe podane są w tabeli 3.

Tabela 3. Stałe materiałowe przyjęte dla gatunku S1100

Materiał	Moduł Younga, E [GPa]	Liczba Poissona, ν [-]
S1100QL	210	0,30

W tabeli 4 przedstawiono odpowiednio wartości maksymalnego i minimalnego naprężenia głównego oznaczone, jako σ_1 , σ_2 oraz kąt β . Dla każdej płyty dokonano pomiarów w 10 punktach. Punkty pomiarowe znajdują się w odległości 5-7 mm od linii wtopienia spoiny. Punkty pomiarowe o numerach 1,2,3,4 znajdują się po stronie lica spoiny, natomiast punkty o numerze 5 znajdują się po stronie grani spoiny.

Tabela 4. Naprężenia własne główne σ_1 , σ_2 oraz kąt β dla strony A

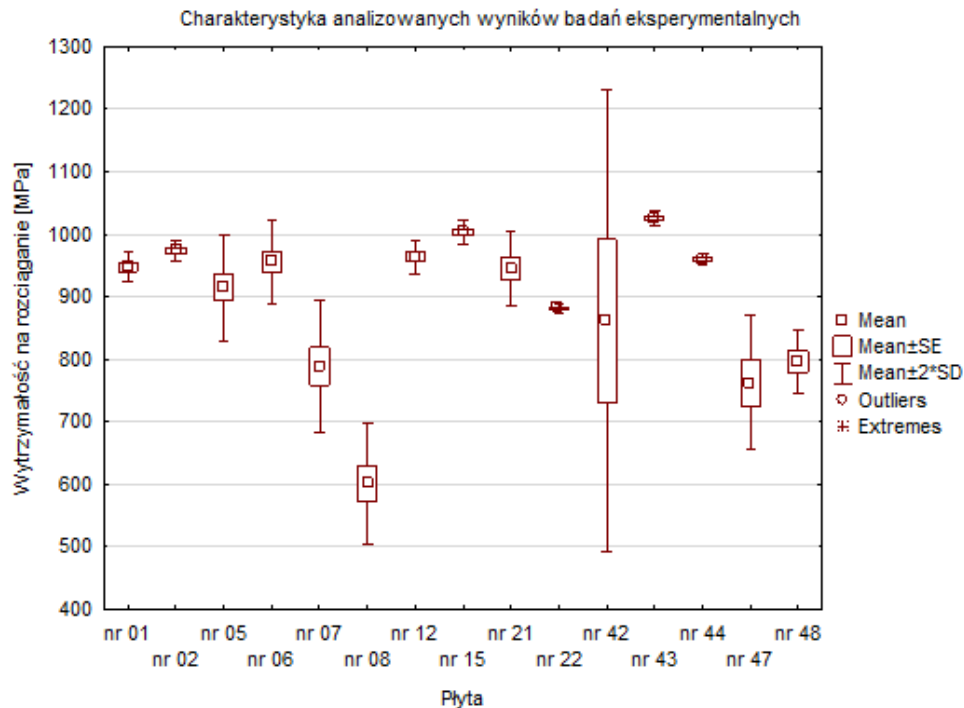
Lp.	Płyta 69			Płyta 111			Płyta 112	
	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	β , [°]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	β , [°]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]
A1	221	-53	85	396	-72	-73	197	8
A2	366	-7	90	371	-30	-67	308	148
A3	400	8	89	329	13	-53	304	96
A4	267	-43	-71	353	-103	-71	290	-10
A5	593	297	89	1081	100	-79	574	103
B1	551	-153	-73	105	44	-73	197	44
B2	366	-91	-77	496	-5	81	324	107
B3	385	-76	-79	266	20	61	387	131
B4	425	-149	-78	414	-175	75	192	36
B5	852	9	-79	838	-192	87	744	70

Wskutek procesu spawania do złącza wprowadza się znaczne naprężenia, które mogą negatywnie wpływać na trwałość zmęczeniową. W celu zidentyfikowania poziomu tych naprężeń wykonana została analiza MES. Dla dwóch płyt, zostały wykonane pomiary geometrii złącza i deformacji wynikających z procesu spawania. Te dane posłużyły do dalszej analizy modelowej.

Model umożliwił analizę wpływu deformacji wskutek spawania na identyfikację naprężenia rozciągającego-ściskającego zmieniającego naprężenie średnie w trakcie próby zmęczeniowego rozciągania-ściskania. W momencie mocowania próbek w szczękach maszyny wytrzymałościowej próbka ulega prostowaniu, które generuje dodatkowe naprężenie.

Analiza wpływu parametrów spawania na wytrzymałość otrzymanych złączy spawanych

Wyniki badań właściwości wytrzymałościowych złączy spawanych poddano analizie statystycznej przedstawiono na rysunku 9. Analizę wpływu parametrów spawania na właściwości wytrzymałościowe przeprowadzono z użyciem porównania wartości średnich wytrzymałości na rozciąganie. Uwagi oraz pary porównawcze zaprezentowano w tabeli. Porównanie wykonano dla złączy doczołowych o grubości łączonych blach równej 12 mm. W obliczeniach zastosowano testy Test U Manna-Whitneya dla porównania średnich dwóch grup. Wyniki porównawcze zaprezentowano w postaci wykresu charakteryzującego średnie oraz tablic zawierającej szczegółowe dane testów wraz z uwagami.



Rysunek 9. Wyniki badań wytrzymałościowych połączeń doczołowych wykonanych z blach o grubości 12 mm wykonanych metodą 135.

Hipotezy dla przeprowadzonych testów zostały postawiona następująco:

- Hipoteza zerowa: „wytrzymałości na rozciąganie obydwu porównanych prób są sobie równe”, czyli nie ma wpływu parametrów spawania na wytrzymałość złącza.
- Hipoteza alternatywna: „wytrzymałość porównywanych płyt jest różna”, czyli istnieją różnice w wytrzymałości złączy wywołane parametrami spawania.

Wnioski oraz spostrzeżenia

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

- Stale wysokowytrzymałe są jeszcze niewystarczająco obszernie przebadane pod kątem zmęczeniowym. Normy przedmiotowe nie zawierając wytycznych projektowych dla stali o granicy plastyczności przekraczającej 700 MPa.
- Na podstawie przeglądu literatury wykazano relatywnie niewielką ilość prac, w których zawarto charakterystyki zmęczeniowe w stanach wyciężenia innych niż rozciąganie-ściśkanie a także dowiedziono, że nieliczne są badania uwzględniające wartość naprężeń własnych spowodowanych procesami spawalniczymi oraz ich wpływ na ogólną trwałość zmęczeniową konstrukcji.
- Połączenia spawane wykonane ze stali S1100QL wykazywały brak różnic w uzyskanych wynikach dla parametrów niskich oraz wysokich bez podgrzewania wstępnego.

- Parametry spawania nie wpływają znacząco na wyniki badań zmęczeniowych.
- Proces spawania niezależnie od parametrów wprowadził naprężenia własne do spoiny.
- Parametry spawania nie wpływają na miejsce powstawania pęknięcia i kształtu propagacji pęknięcia zmęczeniowego.
- Złącza wykorzystane do przeprowadzenia badań zmęczeniowych charakteryzowały się znaczną deformacją wynikającą z przyjętych parametrów spawania.
- Uwzględniono wpływ deformacji na rozkład naprężeń w spoinie obciążonej na stanowisku pomiarowym.
- Obszar technologiczny związany wykonywaniem połączeń spawanych wykonanych metodą 111 i właściwościami zmęczeniowymi tych złączy jest nieprzebadany.
- Pomiar naprężeń wewnętrznych wykonany dla połączeń spawanych, wykonanych z blach stali S1100QL wykazał najwyższe naprężenia wewnętrzne po stronie grani. Co jest również zgodne z mechanizmem rozwoju pęknięć zmęczeniowych zaobserwowanym podczas testów zmęczeniowych.
- W przypadku spoin wielościęgowych parametry pierwszej spoiny różnią się od pozostałych między innymi ilością wprowadzonego ciepła, co w połączeniu z innymi czynnikami może być przyczyną występowania najwyższych naprężeń po stronie grani połączenia.
- Zidentyfikowano wiele czynników mających znaczący wpływ na parametry eksploatacyjne złączy jednak najistotniejsza jest ścisła kontrola parametrów wykonania złącza.
- Zagadnienie wpływu energii liniowej może być przedmiotem dalszych badań w innych konfiguracjach parametrów technologicznych oraz innych stanach naprężenia.
- W przyszłych badaniach podjęte zostaną dalsze prace nad rozszerzeniem ilości przebadanych próbek dla dokładniejszego wyznaczenia charakterystyk.
- Należy poszerzyć wiedzę na temat zjawisk wpływających na mechanizm pęknięcia w stalach wysoko wytrzymałych.