

Rozprawa doktorska

**Mechaniczna redukcja naprężeń i odkształceń
spawalniczych w elementach ze stali konstrukcyjnych
poprzez przekuwanie pneumatyczne o dużej
częstotliwości**

Mgr inż. Mateusz Przybyła

Promotor: Dr hab. inż. Jacek Górka, prof. PŚ

Promotor jednostki wdrażającej: Mgr inż. Andrzej Chudzio,
Główny Spawalnik FAMET S.A.

Gliwice 2024

Spis treści

Streszczenie rozprawy w języku polskim	5
Streszczenie rozprawy w języku angielskim (abstract).....	7
1. Wstęp	9
2. Przegląd piśmiennictwa	11
2.1. Zastosowanie stali konstrukcyjnych	11
2.1.1. Spawalność stali konstrukcyjnych	12
2.2. Naprężenia w połączeniach spawanych.....	19
2.3. Odształcenia w połączeniach spawanych	24
2.3.1. Odształcenia poprzeczne w połączeniach spawanych	26
2.3.2. Odształcenia wzdłużne w połączeniach spawanych ...	28
2.3.3. Odształcenia kątowe w połączeniach spawanych	32
2.4. Czynniki decydujące o stanie naprężeń i odształceń spawalniczych	34
2.4.1. Projektowanie konstrukcji spawanej.....	34
2.4.2. Technika spawania	35
2.4.3. Proces spawania	38
2.5. Metody redukcji naprężeń i odształceń spawalniczych	40
2.5.1. Mechaniczne metody redukcji naprężeń i odształceń.	41
2.5.2. Obróbka cieplna	45
2.6. Podsumowanie przeglądu literatury.....	47
3. Praca własna	49
3.1. Teza i cel pracy	49
3.2. Cele naukowe	50
3.3. Cele technologiczne	50
3.4. Metody eksperymentalne	51

3.5.	Materiały użyte do badań	53
3.6.	Spawanie doczołowych złączy próbných.....	57
3.6.1.	Przekuwanie międzysciegowe HFMI.....	67
3.6.2.	Obróbka cieplna złącza spawanego.....	69
3.7.	Spawanie złączy teowych.....	70
3.7.1.	Przekuwanie międzysciegowe w trakcie i po spawaniu	87
3.7.2.	Pomiar z wykorzystaniem laser trackera.....	90
3.7.3.	Modelowanie procesów spawania i procesów towarzyszących z wykorzystaniem MES	92
4.	Metodyka badań	96
4.1.	Badania zgodnie z wymogami normy PN-EN ISO 15614-1:2017	96
4.2.	Badania na mikroskopie świetlnym	99
4.3.	Analiza mikrostruktury z wykorzystaniem dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych EBSD	100
4.4.	Pomiar naprężeń z wykorzystaniem efektu Barkhausena	101
4.4.1.	Zastosowana metodyka badania stanu naprężenia	103
4.4.2.	Metodyka wyznaczania poziomego naprężenia.....	104
4.5.	Jakościowa analiza fazowa oraz pomiary naprężeń z wykorzystaniem dyfrakcji rentgenowskiej.....	107
5.	Wyniki badań	109
5.1.	Własności mechaniczne badanych złączy.....	109
5.2.	Struktura badanych złączy doczołowych	124
5.3.	Analiza składu fazowego oraz pomiar stanu naprężeń z wykorzystaniem dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego w złączach doczołowych.....	137

5.4.	Pomiar stanu naprężeń z wykorzystaniem efektu Barkhausena w złączach doczołowych	146
5.5.	Pomiary stanu odkształcenia złączy teowych z wykorzystaniem laser trackera.....	154
5.6.	Modelowanie i symulacja stanu odkształceń MES dla wybranych złączy spawanych.....	161
6.	Podsumowanie i wnioski.....	164
	Literatura.....	173

Streszczenie rozprawy w języku polskim

Rozprawa dotyczy oceny wpływu i usystematyzowania wiedzy na temat przekuwania o wysokiej częstotliwości złączy doczołowych i teowych spawanych z wykorzystaniem powszechnie stosowanej w przemyśle techniki GMAW na ich własności i strukturę. W ramach przeprowadzonych badań opracowano także technologię wykonywania przekuwania międzysięgowego w trakcie i po spawaniu. Jako istotny parametr opracowanej technologii przyjęty został rodzaj materiału podstawowego i dodatkowego do spawania, a przede wszystkim jego granica plastyczności. Badania pozwoliły na zestawienie, ocenę i weryfikację różnic w skutkach zastosowania technologii HFMI, klasycznej obróbki cieplnej – wyżarzanie odprężające oraz stanu po spawaniu wytypowanych stali konstrukcyjnych.

W celu osiągnięcia wyżej wymienionych rezultatów dokonano szczegółowej oceny makrostruktury oraz mikrostruktury złączy spawanych. Dzięki wykonanym badaniom dokonano opisu zmian w zależności od zastosowanych zabiegów w trakcie i po spawaniu, a następnie powiązano je z testami mechanicznymi, obejmujących testy gięcia bocznego, wytrzymałości na rozciąganie, badanie udarność w materiale spoiny i strefy wpływu ciepła oraz pomiaru twardości. Przeprowadzono również analizę zmian w zakresie rozkładu naprężeń własnych i reszkowych z wykorzystaniem efektu Barkhausena. Aby zapewnić zbliżone warunki spawania opracowano technologię spawania na stanowisku zrobotyzowanym. W dalszej części

opracowania została przedstawiona szczegółowa analiza wpływu technologii HFMI na stan odkształcenia teowego złącza spawanego z obustronną spoiną pachwinową wykonana na tej samej grupie materiałowej co w przypadku złączy doczołowych. W tym przypadku spawanie odbyło się w trybie półautomatycznym z wykorzystaniem rejestracji parametrów spawalniczych poprzez wbudowany układ pomiarowy w urządzeniu spawalniczym co umożliwiło bardzo precyzyjne zestawienie danych.

Przeprowadzone badania pozwoliły na opracowanie technologii przekuwania HFMI w wymiarze wdrożeniowo – przemysłowym. Technologia ta jeszcze przed opracowaniem wszystkich wyników znalazła szerokie zastosowanie w zakresie napraw i poprawy układu geometrycznego w przypadku nieprzewidywalnych zmian w układzie odkształceń i naprężeń wielkogabarytowych i bardzo precyzyjnie obrabianych elementów będących krytycznymi elementami odpowiedzialnymi konstrukcji generatorów prądotwórczych w elektrowniach wiatrowych, wodnych czy też energetyki węglowej, gazowej i jądrowej.

Streszczenie rozprawy w języku angielskim (abstract)

The dissertation concerns the evaluation of the impact and systematisation of the knowledge of high-frequency hammer peening of butt and T-joints welded using the GMAW technique commonly used in industry on their properties and structure. The research also included the development of a technology for performing inter-layer HFMI process during and after welding. The type of base material and welding consumable type to be welded, and above all its yield strength, was adopted as an important parameter of the developed technology. The research made it possible to collate, evaluate and verify the differences in the effects of applying HFMI technology, classical heat treatment - stress relief annealing and the post-weld condition of selected structural steels.

In order to achieve the aforementioned results, the macrostructure and microstructure of welded joints were evaluated in detail. Thanks to the tests performed, a description of the changes depending on the treatments applied during and after welding was made and then related to mechanical tests, including side-bending tests, tensile strength, impact testing in the weld material and heat affected zone, and hardness measurements. An analysis of the variation in inherent and residual stress distribution using the Barkhausen effect was also carried out. In order to ensure similar welding conditions, a robotised bench welding technology was developed. A detailed analysis of the effect of the HFMI technology on the deformation state of a T-joint

welded with a fillet weld on both sides performed on the same material group as for butt joints is presented in the following section. In this case, the welding was carried out in semi-automatic mode using the recording of welding parameters via the built-in measuring system in the welding machine, which enabled very precise data compilation.

The research carried out allowed the development of an HFMI forging technology with an implementation and industrial dimension. This technology, even before all the results were compiled, found wide application in the field of repair and improvement of the geometric layout in the case of unpredictable changes in the deformation and stress system of large-size and very precisely machined components, which are critical elements of the most responsible structures of power generators in wind, hydroelectric or coal, gas and nuclear power plants.

1. Wstęp

Zjawiskami, które towarzyszą procesom spawalniczym, a jednocześnie stanowią jedne z najbardziej niepożądanych skutków spawania są powstałe w wyniku procesu takie zjawiska jak: przemiany fazowe związane ze zmianą objętości, nierównomierne oraz szybkie nagrzewanie i chłodzenie, jak również zmiany własności takich jak moduł Younga E , granica plastyczności R_e , czy współczynnik rozszerzalności cieplnej α podczas nagrzewania i chłodzenia. Ze względu na złożony proces ich powstawania są one bardzo trudne do przewidzenia i trudne do całkowitej eliminacji.

W związku z tym istnieje konieczność poszukiwań i rozwoju nowych technologii lub alternatywnego zastosowania istniejących technik umożliwiających zredukowanie naprężeń i odkształceń spawalniczych. Za powszechnie stosowaną w przemyśle ciężkim metodę relaksacji naprężeń i odkształceń uważa się obróbkę cieplną. Wyróżnia się dwie podstawowe jej odmiany: wyżarzanie odprężające i normalizację. Obróbka cieplna wymaga posiadania pieca elektrycznego, gazowego lub w przypadku miejscowej obróbki, urządzeń oporowych lub indukcyjnych co wiąże się z szeregiem ograniczeń. Inną z metod redukcji naprężeń i odkształceń jest obróbka wibracyjna konstrukcji po zakończeniu procesu spawania. Znane są także metody projektowe i technologiczne umożliwiające ograniczenie skutków spawania. Do metod projektowych należą: dobór odpowiednich materiałów charakteryzujących się dobrą spawalnością, ograniczanie krzyżowania się spoin, projektowanie z uwzględnieniem dobrego dostępu do wykonywania złączy spawanych

aby uniknąć spawania w pozycjach wymuszonych lub z koniecznością wykonywania spawania jednostronnego. Do metod technologicznych należą: kwalifikowanie odpowiednich technologii spawania, dbałości o prace montażowe obejmujące przygotowanie elementów do spawania zgodnie z zaprojektowaną wcześniej dokumentacją kończącą na właściwej i przemyślanej kolejności spawania i pryncypialnej kontroli jakości złączy spawanych kończąc.

Obecny stan wiedzy w zakresie przekuwania o wysokiej częstotliwości czy też przekuwania ultradźwiękowego jest obszerny lecz należy tutaj zwrócić uwagę, że większa część artykułów i opracowań w tym obszarze skupiona jest na poprawie wytrzymałości zmęczeniowej poprzez zastosowanie technologii HFMI, przykładem są wytyczne Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa [1, 76, 78, 86, 96, 100].

W związku z tym opracowanie technologii wykonywania przekuwania międzyścigowego oraz przekuwania po zakończeniu spawania warunkuje powszechniejsze i szersze stosowanie tego podejścia celem redukcji naprężeń i odkształceń zwłaszcza w przypadku gdy klasyczne metody opisane wyżej zawiodą lub też z przyczyn ograniczeń materiałowych lub technologicznych nie mają praktycznego zastosowania [62, 68].

2. Przegląd piśmiennictwa

2.1. Zastosowanie stali konstrukcyjnych

Stale konstrukcyjne są powszechnie stosowane do wytwarzania od prostych i nieobciążonych konstrukcji aż po konstrukcje, od których wymaga się pracy w skrajnych warunkach obciążeń statycznych lub dynamicznych przy jednoczesnym kryterium, jakim jest najniższa masa. Wśród metod łączenia tych materiałów zwłaszcza o grubości powyżej 3 mm dominujące są technologie spawalnicze.

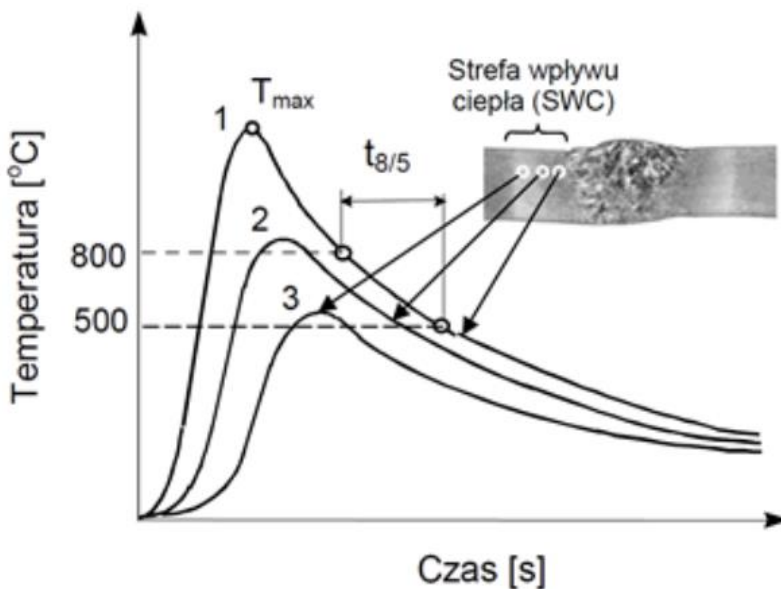
Do najpowszechniejszych gatunków wykorzystywanych w przemyśle ciężkim należą stale konstrukcyjne z gatunku S235 oraz S355. Stale te zaliczane są do grupy stali konstrukcyjnych niestopowych jakościowych, a warunki techniczne dla tych stali opisuje norma PN-EN 10025-2:2019 [3n]. Wśród podstawowych warunków dostawy wyróżnia się stan po walcowaniu normalizującym w przypadku gatunku S355 z dopiskiem +N, czy w stanie po walcowaniu dla którego nie określono specjalnych warunków walcowania i/lub obróbki cieplnej po walcowaniu, w takim przypadku np. dla gatunku S235 stosowany jest zapis +AR.

Kolejną istotną grupę stali konstrukcyjnych stanowią opisane w normie PN-EN 10025-3:2019 [4n] stale drobnoziarniste po normalizacji lub walcowaniu normalizującym. Proces ten polega na walcowaniu w zakresie temperatury właściwym dla obróbki cieplnej – normalizacji co zapewnia drobnoziarnistą strukturę oraz podwyższone własności wytrzymałościowe. W grupie tych stali najwyższym gatunkiem ze względu na minimalną granicę plastyczności jest stal S460N.

W przypadku konstrukcji pracujących w ekstremalnych warunkach jeśli chodzi o obciążenia zastosowanie znajdują stale opisane w normie PN-EN 10025-6:2019 [5n]. Są to stale konstrukcyjne o podwyższonej granicy plastyczności w stanie hartowanym i odpuszczonym. Proces obróbki cieplnej dla tych stali polega na podgrzaniu powyżej 900°C i jak najszybszym chłodzeniu i następnym odpuszczaniu czyli ponownym poddaniu materiału obróbce cieplnej polegającej na podgrzaniu do temperatury 540-580 °C i następnym chłodzeniu na wolnym powietrzu bez wymuszonego obniżania temperatury. Tak wyprodukowana stal łączy wysoką wytrzymałość i udarność przy relatywnie niskiej twardości [57].

2.1.1. Spawalność stali konstrukcyjnych

W procesie spawania obszar metalu przylegający do spoiny jest poddawany nagrzewaniu do różnych maksymalnych temperatur, które zależą od odległości od źródła ciepła. Po zakończeniu nagrzewania następuje faza stygnięcia, która wynika głównie z odprowadzania ciepła do otaczającego materiału o niższej temperaturze, aż do osiągnięcia równowagi termicznej złącza, (Rys 1). Prędkość stygnięcia zmniejsza się w miarę obniżania się temperatury. W celu określenia średniej prędkości stygnięcia złącza spawanego, powszechnie stosowanym parametrem jest czas stygnięcia w zakresie temperatur 800-500 °C, wyrażony w sekundach, który oznaczany jest symbolem $t_{800-500}$ lub $t_{8/5}$. [20, 68, 70]

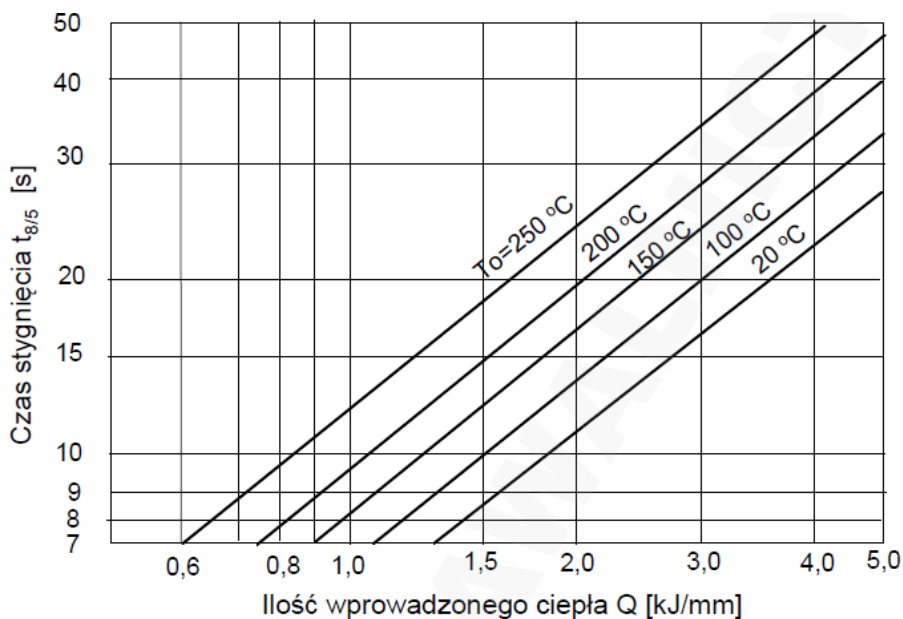


Rys. 1. Cykle cieplne spawania [20]

Parametrem jakim jest czas stygnięcia $t_{8/5}$ można sterować poprzez dwa podstawowe czynniki:

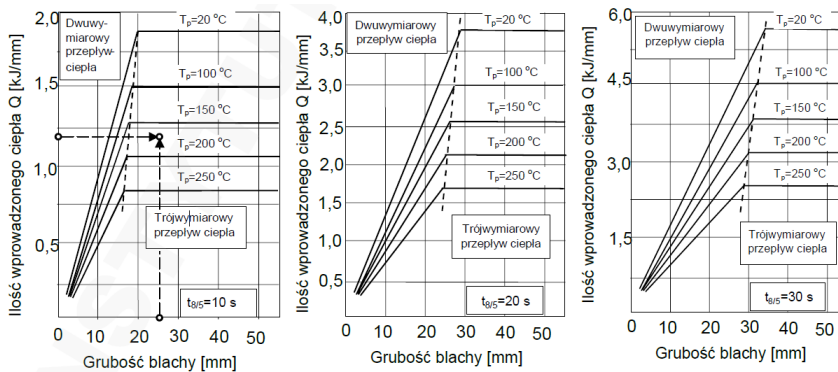
- ilość ciepła wprowadzonego do złącza,
- wysokość temperatury podgrzania wstępnego do spawania.

Na Rys. 2 przedstawiona jest zależność parametru $t_{8/5}$, w funkcji ilości wprowadzonego ciepła Q z uwzględnieniem różnych temperatur podgrzania wstępnego do spawania.



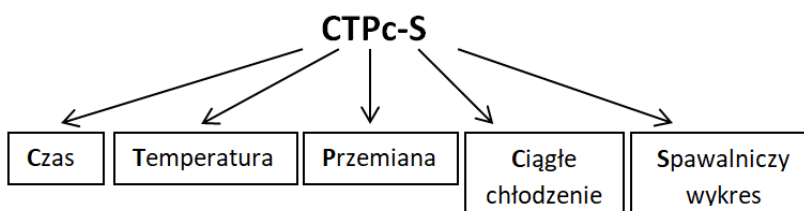
Rys. 2. Czas stygnięcia w funkcji wprowadzonego ciepła dla różnych warunków podgrzewania wstępnego [20]

Poza czasem stygnięcia i ilością wprowadzonego ciepła, należy także każdorazowo wziąć pod uwagę grubość materiałów podstawowych ze względu na to, że im grubszy materiał podstawowy będzie spawany tym szybkość odprowadzania ciepła będzie większa, a także temperatura podgrzewania do spawania będzie wyższa [33, 47]. Zależność pomiędzy ilością wprowadzonego ciepła, grubością materiału podstawowego oraz temperaturą wstępnego podgrzewania do spawania dla trzech przykładowych czasów stygnięcia $t_{8/5}$ przedstawia Rys. 3 [20].



Rys. 3. Ilość wprowadzonego ciepła w funkcji grubości łączonych blach oraz temperatury podgrzewania wstępnego dla czasów $t_{8/5}$ wynoszących odpowiednio 10, 20 oraz 30s [20]

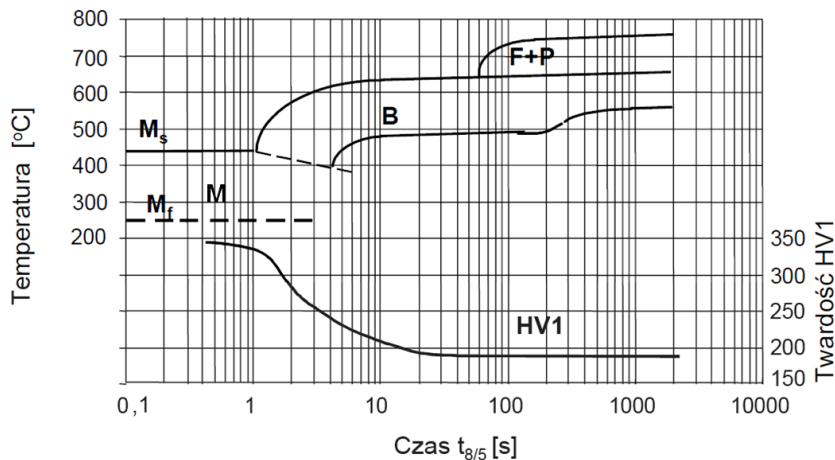
Czas stygnięcia $t_{8/5}$ ma kluczowe znaczenie w kontekście własności i struktury zwłaszcza w strefie wpływu ciepła. Typ struktury w SWC oraz twardość wynikająca z dynamiki procesu spawania określana jest w odniesieniu do spawalniczych wykresów obrazujących przemianę austenitu. Wykresy te zwane są CTPc-S, a rozwinięcie tej nazwy przedstawia Rys. 4.



Rys. 4. Składowe oznaczenia wykresów CTPc-S [20]

Wykres CTPc-S (Rys. 5) umożliwia bezpośredni odczyt temperatury przemiany, rodzaj mikrostruktury, a także twardość

w funkcji parametru $t_{8/5}$, który może być zmierzony lub wyznaczony obliczeniowo.

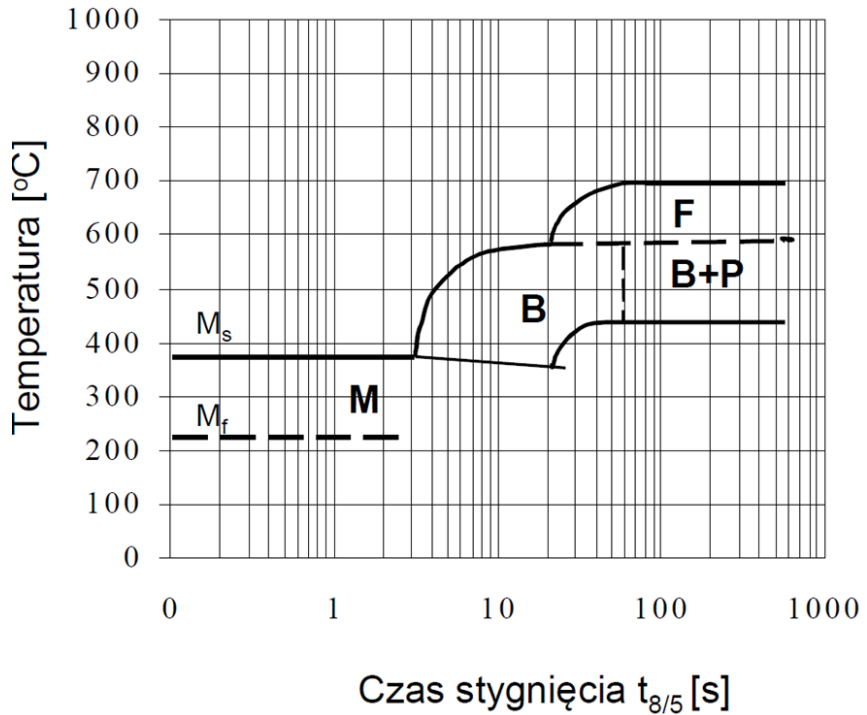


Rys. 5. Wykres CTPc-S dla stali konstrukcyjnej w układzie temperatura – czas stygnięcia $t_{8/5}$ [20]

Poza twardością i rodzajem mikrostruktury z wykresu przedstawionego na Rys. 5 można także odczytać:

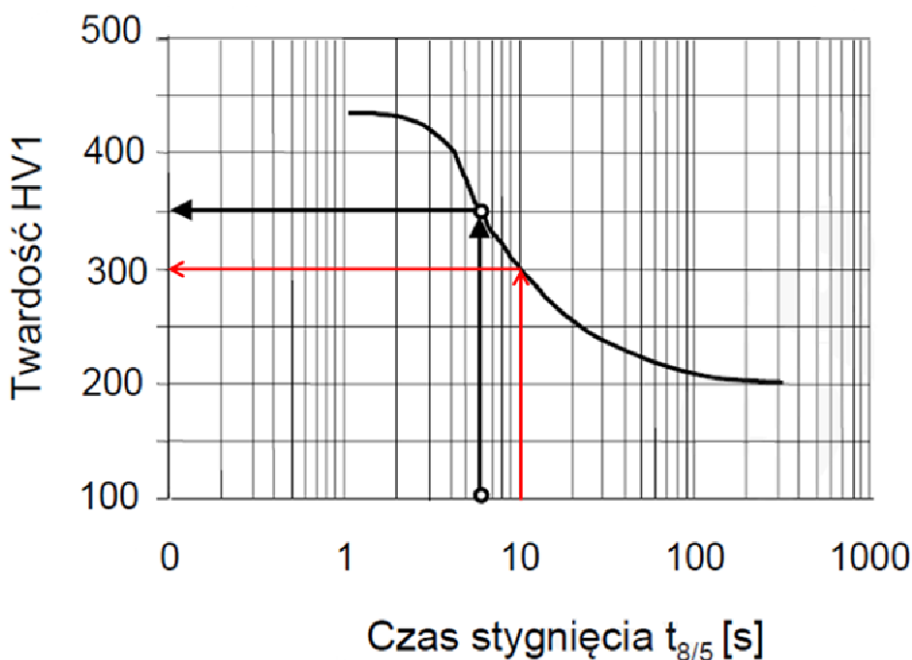
- M_s – temperaturę *martenzyt start* – początek przemiany martenzytycznej,
- M_f – temperaturę *martenzyt finish* – początek przemiany martenzytycznej,
- M – zakres występowania przemiany martenzytycznej,
- B – zakres występowania przemiany bainitycznej,
- $F+P$ – zakres występowania przemiany ferrytycznej i perlitycznej.

Jedną z najpowszechniej stosowanych stali konstrukcyjnych jest stal z gatunku S355 i dla niej właśnie Rys. 6 przedstawia wykres CTPc-S.



Rys. 6 Wykres CTPc-S dla stali konstrukcyjnej S355J2+N

Z wykresu przedstawionego na Rys. 6 wynika, że dla czasu stygnięcia $t_{8/5}$ do 3 sekund występuje niekorzystna z punktu widzenia twardości SWC pełna przemiana martenzytyczna. Czas stygnięcia wydłużony do 6 sekund jest równoznaczny z wystąpieniem struktury martenzytyczno-bainitycznej. Rys. 7 przedstawia rozkład twardości w funkcji stygnięcia dla tego samego materiału.



Rys. 7. Rozkład twardości w skali Vickersa w funkcji parametru $t_{8/5}$ [20]

Na Rys. 7 czarnymi strzałkami zaznaczono wartość twardości 350 HV1 w przypadku parametru $t_{8/5}$ wynoszącego 6 sekund. Kolorem czerwonym zaznaczono wartość twardości 300HV1 w przypadku parametru $t_{8/5}$ wynoszącego 10 sekund. Przykłady te obrazują jak parametrem $t_{8/5}$ można sterować kluczową dla wytrzymałości połączenia spawanego twardością.

Jak już wspomniano, temperatura podgrzewania do spawania umożliwia sterowanie parametrem $t_{8/5}$. Warunki, w których w wyniku spawania osiąga się twardość w SWC w okolicach 300HV1 jest możliwy pod spełnieniu założeń przedstawionych na Rys. 3, na którym w przypadku parametru $t_{8/5} = 10$ sekund dla blachy o grubości 25 mm oraz ilości wprowadzonego ciepła na poziomie 1,22 kJ/cm

temperatura, do której należałoby podgrzać materiały łączone to minimum 170 °C

Naprężenia w połączeniach spawanych

Najbardziej niepożądanymi zjawiskami związanymi z procesem spawania są naprężenia i odkształcenia w złączach spawanych. Zjawisko to jest trudne do kontroli i jednoczesnego sterowania. Naprężenia stanowią zagrożenie dla całej konstrukcji, ponieważ mogą potencjalnie prowadzić do jej uszkodzenia. Naprężenia wynikają z kurczenia się spoiny podczas jej schładzania z temperatury plastyczności, około 600-650°C, do temperatury otoczenia, w której konstrukcja będzie użytkowana. Procesy spawania niezmiennie wywołują znaczne naprężenia z powodu różnicy rozszerzalności cieplnej i kurczenia się spoiny spowodowanej miejscowym nagrzewaniem łączonych elementów. Wielkość tych naprężeń może osiągnąć granicę plastyczności spawanego materiału. Naprężenia wywołane spawaniem mogą powodować znaczne odkształcenia konstrukcji, a w niektórych przypadkach prowadzić do ich pęknięcia. W związku z tym materiały przeznaczone na konstrukcje spawane powinny charakteryzować się odpowiednio wysoką plastycznością [23]. Warto zauważyć, że naprężenia spawalnicze powstają nie tylko w złożonych strukturach, ale także w prostych konfiguracjach, takich jak dwie swobodnie leżące blachy. Kwestia naprężeń spawalniczych ma zatem ogromne znaczenie, ale często jest niedoceniana i nie jest uwzględniana w obliczeniach wytrzymałościowych konstrukcji [73]. Naprężenia, które powstają w materiale w wyniku obróbki mechanicznej lub termicznej - takiej jak odlewanie, walcowanie,

hartowanie, kucie czy procesy spawania, a te które pozostają w materiale po zakończeniu procesu, nazywane są naprężeniami szczątkowymi [2].

Naprężenia wywołane w materiale w wyniku spawania lub obróbki cieplnej, które utrzymują się po zakończeniu tych procesów, nazywane są naprężeniami własnymi. Naprężenia własne definiuje się jako naprężenia, które równoważą się wzajemnie w określonym obszarze bez żadnego obciążenia zewnętrznego. Oznacza to, że muszą być spełnione następujące warunki:

- suma rzutów wszystkich sił wewnętrznych w dowolnej lokalizacji elementu musi być równa zero,
- suma momentów wynikających z sił wewnętrznych w dowolnej sekcji elementu musi być równa zero.

W zależności od procesu technologicznego, który je wywołał, naprężenia własne są również nazywane od nazwy procesu, np. naprężenia odlewnicze, naprężenia powstałe z obróbki cieplnej i naprężenia spawalnicze.

Naprężenia własne, w tym naprężenia spawalnicze, są klasyfikowane według obszaru ich oddziaływania w następujący sposób:

- **pierwszego rzędu:** naprężenia te występują w dużych objętościach metalu, wpływając na całą konstrukcję lub poszczególne elementy (węzły, połączenia). Występują w konstrukcjach spawanych, działając w kierunku poprzecznym i wzdłużnym względem spoin oraz wzdłuż lub w poprzek osi poszczególnych elementów konstrukcyjnych,

- **naprężenia drugiego rzędu:** naprężenia te oddziałują na jedno lub więcej ziaren metalu bez określonej orientacji względem osi elementu,
- **trzeciego rzędu:** naprężenia te występują na poziomie sieci krystalograficznej metalu, występując pomiędzy elementami w obrębie sieci przestrzennej metalu.

Naprężenia pierwszego rzędu można dalej klasyfikować w oparciu o liczbę zaangażowanych komponentów:

- **jednoosiowe:** występują w prętach,
- **dwuosiowe:** naprężenia w stanie płaskim, występujące w cienkich blachach,
- **trójosiowe:** naprężenia w stanie przestrzennym, występujące w grubych blachach, zwykle znaczące dla grubości większych niż 20 mm.

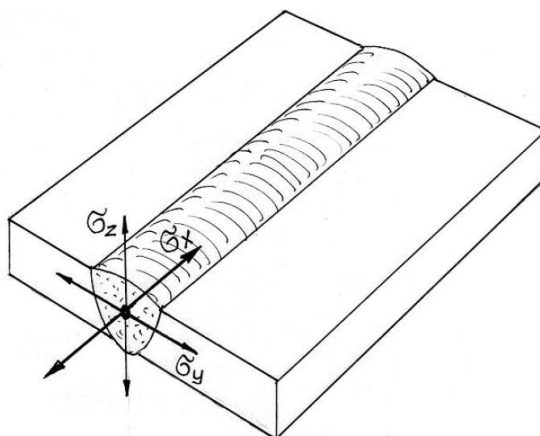
W przypadku połączeń spawanych istotne są przede wszystkim naprężenia pierwszego rzędu. W przypadku spawania stali stopowych, w których przemiany zachodzą w znacznie niższych temperaturach w porównaniu do stali niskostopowych, istotne są również naprężenia drugiego rzędu. Naprężenia spawalnicze są również klasyfikowane na podstawie ich kierunku względem spoiny:

- **wzdłużne (σ_x):** względem osi x spoiny,
- **poprzeczne (σ_y):** względem osi y spoiny,
- **prostopadła (σ_z):** do powierzchni łączonych elementów.

Dodatkowo, naprężenia są klasyfikowane w oparciu o ramy czasowe, w których oddziałują:

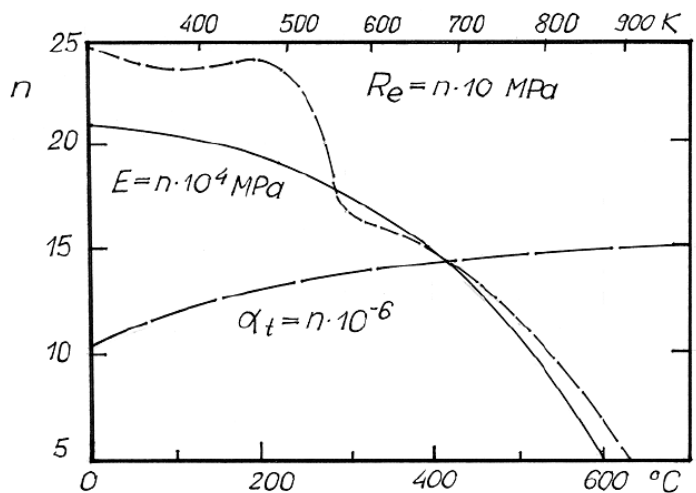
- **naprężenia chwilowe:** wielkość i kierunek, które zależą od aktualnego rozkładu temperatury, zmieniającego się w trakcie trwającego cyklu,
- **naprężenia ostateczne (wewnętrzne, resztkowe):** powstające w poszczególnych elementach lub całej konstrukcji po zakończeniu procedury technologicznej i schłodzeniu przedmiotu obrabianego.

Kierunki działania naprężeń powstałych w spoinie łączącej dwie blachy przedstawia Rys. 8.



Rys. 8. Naprężenia wzdłużne (σ_x), naprężenia poprzeczne (σ_y), naprężenia normalne/prostopadłe (σ_z) [4]

Jako, że zmiana temperatury oznacza zmianę własności wytrzymałościowych w stalach konstrukcyjnych, sam przebieg jest różny w zależności od zakresów tej temperatury [30]. Zmiana parametrów takich jak moduł sprężystości Young'a, współczynnik rozszerzalności czy też granicy plastyczności w funkcji zmiany temperatury przedstawia Rys. 9 oraz Tabela 1.



Rys. 9. Zmiana parametrów: E, R_e oraz α w funkcji temperatury [4]

Tabela 1. Zmiana własności wytrzymałościowych w zależności od temperatury

Temperatura [°C]	Moduł Young'a $E \cdot 10^2$ [GPa]	Granica plastyczności R_e [MPa]	Współczynnik rozszerzalności cieplnej $\alpha \cdot 10^{-6}$ [1/K]
0	2,10	240	11,5
100	1,96	222	11,9
200	1,88	226	12,5
300	1,75	165	13,0
400	1,59	152	13,6
500	1,20	125	14,2
600	0,60	63	14,8

Za zmianą własności, które przedstawione są na Rys. 9 oraz Tabeli 1, następuje powstawanie naprężeń własnych w konstrukcjach

spawanych. Można wywnioskować, że własności sprężyste materiału spadają niemal do zera w temperaturze 600°C, a z tym związany jest wniosek, że naprężenia własne nie powstają ponieważ, zakres powstawania naprężeń własnych zgodnie z Rys. 9 mieści się poniżej temperatury 600°C.

2.2. Odształcenia w połączeniach spawanych

W elementach o dużej masie i sztywności, odształcenia są pomijalne w związku z gabarytami konstrukcji (natomiast naprężenia są bardzo duże), w konstrukcji spawanej ażurowej i wiotkiej odształcenia są bardzo duże natomiast naprężenia spawalnicze pomijalne. Zależność występowania odształceń spawalniczych w funkcji sztywności konstrukcji wynika z przebiegu procesu spawania, a zwłaszcza skurczu spawalniczego krzepnącego materiału spoiny i powstałego na skutek tego odształcenia o charakterze plastycznym strefy przyspoinowej w trakcie nagrzewania [11, 82, 90].

Odształcenia spawalnicze przyjmując trójosiowy stan naprężeń podczas wykonywania procesów spawalniczych można podzielić na:

- wzdłużne w kierunku osi X spoiny,
- poprzeczne w kierunku osi Y spoiny,
- normalne występujące na grubości materiału spawanego w kierunku osi Z spoiny.

Odształcenia można także sklasyfikować w zależności od przyczyn ich występowania i dzieli się je na:

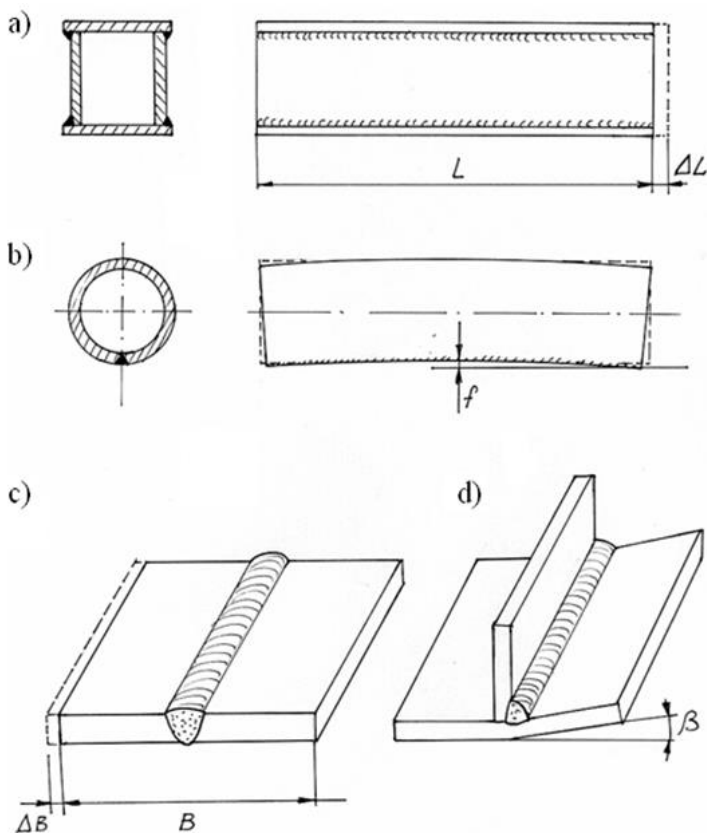
- odształcenia spoiny i materiału przy spoinie w kierunku prostopadłym do długości spoiny czyli tzw. skurczem poprzecznym,

- odkształcenia spoiny i materiału przy spoinie w kierunku zgodnym z kierunkiem spawania czyli tzw. skurczem wzdłużnym.

Poza klasyfikacją wynikającą z kierunku występowania, należy wyróżnić złożone postacie deformacji spawalniczych takich jak:

- odkształcenie wzdłużne, czyli zmiana wymiarów liniowych w elementach leżących w płaszczyźnie elementu, mierzona wzdłuż spoiny,
- skurcz poprzeczny, czyli zmiana geometrii liniowej konstrukcji w kierunku prostopadłym do osi złącza spawanego, zachodząca w płaszczyźnie np. blachy,
- wygięcie, czyli zmiana kształtu, spowodowana odkształceniem wzdłużnym i poprzecznym, pojawiająca się w płaszczyźnie równoważnej elementu. Miara tego odkształcenia jest strzałka ugięcia, kąt ugięcia i promień krzywizny,
- utrata stateczności czyli odkształcenie elementów ażurowych, powłokowych o małej sztywności poprzecznej występujące w kierunku poprzecznym do powierzchni tych elementów,
- skręcenie czyli zmiana kształtu bardzo długich elementów konstrukcji z prostych na spiralne wywołane spawaniem wzdłużnym, a miarą skręcenia jest kąt obrotu dwóch przekrojów poprzecznych względem siebie,
- odkształcenie kątowe czyli deformacja wywołana skurczem poprzecznym, którego miarą jest kąt odchylenia płaszczyzn elementów spawanych ze sobą [10].

Na Rys. 10 przedstawiono ideowo przykłady odkształceń w przypadku podstawowych geometrii występujących w konstrukcjach spawanych wraz z miarą tych odkształceń w zależności od kierunku.



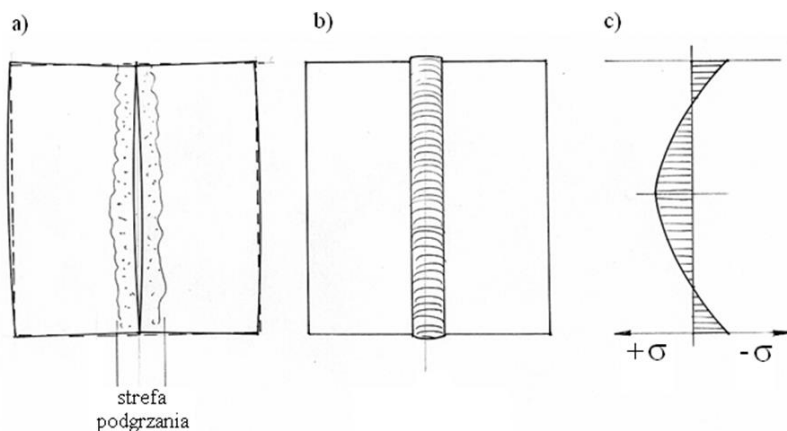
Rys. 10. Odkształcenia a) wzdłużne, b) wygięcie, c) poprzeczne, d) kątowe [9]

2.2.1. Odkształcenia poprzeczne w połączeniach spawanych

Przyczyną powstawania odkształcenia poprzecznego jest nieliniowy oraz dynamicznie zmieniający się podczas procesu spawania gradient temperatury. Strefa nagrzana, która jest

jednocześnie otoczona przez materiał rodzimy, który ma znacznie niższą temperaturę jest poddany intensywnemu odkształceniu plastycznemu zwanemu spęceniem materiału. W trakcie procesu spawania w określonej odległości za źródłem spawania gdzie elementy są ze sobą już połączone, a temperatura jest na tyle niższa, że powstałe złącze spawane przeciwdziała swobodnemu skurczowi w kierunku poprzecznym, a więc odkształcenie plastyczne w nieznacznym stopniu ulega zmniejszeniu. Odkształcenie poprzeczne występuje w złączach spawanych niezależnie od przygotowania złącza (z odstępem czy bez odstęp), a także w elementach napawanych [12].

W normalnych okolicznościach na strefę przyspoinową przypada około 80% odkształceń poprzecznych, a pozostałe 20% dotyczy samej spoiny. Na Rys. 11 przedstawiono schemat powstawania odkształceń poprzecznych w złączu doczołowym.

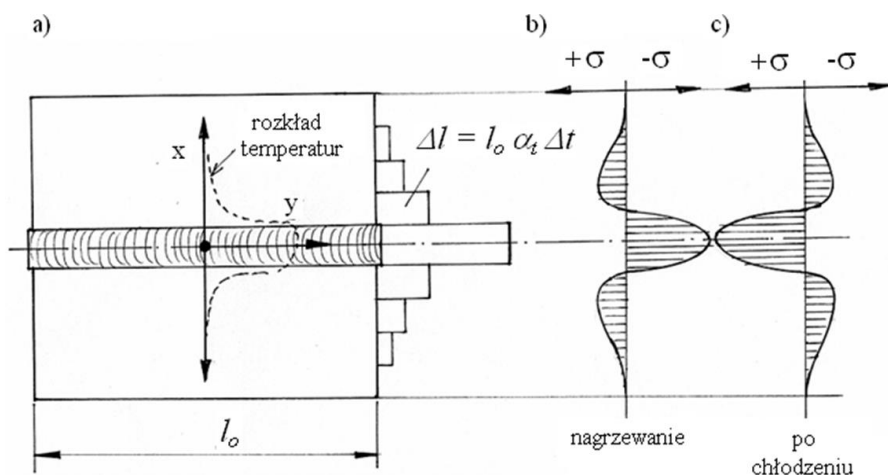


Rys. 11. Przebieg powstawania odkształceń poprzecznych w połączeniu spawanym: a) wygięcie blach nagranych na krawędzi, b) odkształcenie blach po spawaniu, c) obraz naprężeń i wynikających z nich odkształceń poprzecznych w spoinie [13]

Gdyby podczas spawania, pomiędzy blachami byłyby odpowiednia szczelina, tak aby po przejściu źródła ciepła nie nastąpiło trwałe połączenie, wtedy przy odpowiedniej smukłości odkształciłyby się tak jak na Rys. 4a. W rzeczywistości podczas spawania blachy się tak nie odkształcają, a powodem tego jest to, że spoina nie podlega naprężeniom ściskającym w obszarach, gdzie blachy się ze sobą stykają, a także nie podlega rozciąganiu w środku połączenia spawanego, gdzie spoina powoduje skurcz i doprowadza do ściągania odkształcających się blach [26].

2.2.2. Odkształcenia wzdłużne w połączeniach spawanych

Wzdłużne odkształcenia są efektem skurczu w kierunku podłużnym, a wielkość tego odkształcenia jest definiowana przez parametr stosunku pola powierzchni przekroju elementu spawanego do pola powierzchni przekroju spoiny. Kierunek odkształcenia wzdłużnego spoiny jest równoległy do jej osi. Siła skurczu, będąca wynikiem procesów cieplnomechanicznych w połączeniu spawanym oraz w strefie przyspoinowej oddziałuje na cały element spawany. Jeśli parametr pola powierzchni przekroju elementu do pola powierzchni spoin jest wysoki to skurcz podłużny jest bliski zeru, natomiast w przypadku parametru o niskiej wartości skurcz podłużny wyrażony w mm/m spoiny rośnie wykładniczo [4]. Na Rys. 12 przedstawiono nierównomierny rozkład temperatur występujący przy spawaniu dwóch szerokich blach.



Rys. 12. a) rozkład temperatury i naprężeń wzdłużnych w połączeniu spawanym, b) podczas grzania, c) po całkowitym ostygnięciu [4]

Na Rys. 12 widać wyraźnie, że najwyższa temperatura jest w osi spawania, a w miarę oddalania się od tej osi, temperatura gwałtownie obniża się, a w przedstawionym przypadku dwóch szerokich blach, temperatura na zewnętrznych krawędziach tych blach jest równa temperaturze otoczenia. Cykle nagrzewania i chłodzenia wraz z wynikającymi z nich odkształceniami bardzo wyraźnie przedstawiają jak materiał odkształca się poprzez rozszerzanie i kurczenie w trakcie spawania. Oznacza to że obszary złącza mniej nagrzane znajdujące się bliżej krawędzi zewnętrznej blach, hamują odkształcenie poprzeczne obszarów nagrzanych do wyższej temperatury znajdujące się bliżej osi spoiny. W rezultacie sama spoina jak również strefa wpływu ciepła nie mogą swobodnie się rozszerzać, doznając naprężeń ściskających podczas gdy pozostałe obszary są rozciągane. Obszary będące pod wpływem tych naprężeń ulegają tak zwanemu spęczeniu. W trakcie cyklu chłodzenia połączenie spawane ulega skurczowi termicznemu, a

w rezultacie powstaje bardzo duże naprężenie rozciągające oraz wynikające z tego odkształcenie wzdłużne całego połączenia spawanego [9].

Skurcz podłużny może spowodować nie tylko zmianę długości elementów spawanych, ale także znaczące wygięcie. Najczęściej objawia się to wówczas gdy siły skurczu podłużnego przesunięte są względem tzw. środka ciężkości czy też osi przekroju poprzecznego elementu spawanego. Gdy siły skurczu poprzecznego i wywołany nim moment gnący pokona sztywność elementu nastąpi jego odkształcenie. Można to wyrazić obliczeniowo jako wielkość strzałki ugięcia i będzie zależeć od kilku czynników, a samą wartość obliczyć można z następującego wzoru (1) [4]:

$$f = \frac{PFal^2}{8EJ} \quad (1)$$

gdzie:

f – strzałka ugięcia [mm]

P – siła skurczu, a dokładniej naprężenie skurczu [MPa]

F – pole powierzchni przekroju poprzecznego spoiny [mm²]

a – odległość środka ciężkości spoiny od środka ciężkości całego przekroju

l – długość spoiny

E – moduł sprężystości podłużnej $2,1 \cdot 10^5$ MPa

J – moment bezwładności przekroju względem jego środka ciężkości

Wartość siły skurczu P uwarunkowana jest wieloma czynnikami takimi jak: metoda spawania, wielkość spoiny i rodzaj spoiny. W Tabeli 2 przedstawiono siły skurczu podczas spawania w zależności od czynników mających kluczowy wpływ na wartość skrócenia elementu.

Tabela 2. Zestawienie wartości sił skurczu dla spawania elektrodami otulonymi

Rodzaj spoiny		Pole przekroju [mm ²]	Rozmiar spoiny [mm]	Jednostkowa wzdłużna siła skurczu [MPa]
Spoiny czołowe	V jednościgowe	≤ 50	≤ 8	6,5
	V wielościgowe	≤ 75	≤ 8	5,0
		≤ 100	≤ 10	4,0
	X symetryczne	≤ 200	≤ 20	3,25
		≤ 350	≤ 24	2,5
	X niesymetryczne	≤ 250	≤ 28	1,75
U wąskoszczelinowe	≤ 400	≤ 28	1,0	
Spoina pachwinowa	jednościgowa	≤ 50	< 7	6,25
	wielościgowa	≤ 75	≤ 9	4,75
		≤ 100	≤ 10	3,75
		≤ 250	≤ 16	2,5
		≤ 400	≤ 20	1,0

Tabela 2 przedstawia wartości, które są dowodem na to, że spoiny wielościęgowe i spawane obustronnie charakteryzują się znacznie mniejszą wzdłużną siłą skurczu. Jest to spowodowane przede wszystkim faktem, że w przypadku spawania wielościęgowego każda kolejna warstwa spawania odpręża cieplnie poprzednie ułożone ściegi spawalnicze, a w przypadku spawania obustronnego rozkład naprężeń i odkształceń jest znacząco korzystniejszy biorąc pod uwagę porównanie ze spoiną jednostronną czołową czy też pachwinową.

Wzór umożliwiający obliczenie wartości skrócenia elementu po spawaniu w wyniku oddziaływującej siły skurczu jest następujący (2) [4]:

$$\Delta l = \frac{PF l}{EA} \quad (2)$$

gdzie:

Δl – wartość skrócenia [mm]

P – siła skurczu [MPa]

F – pole przekroju spoiny [mm²]

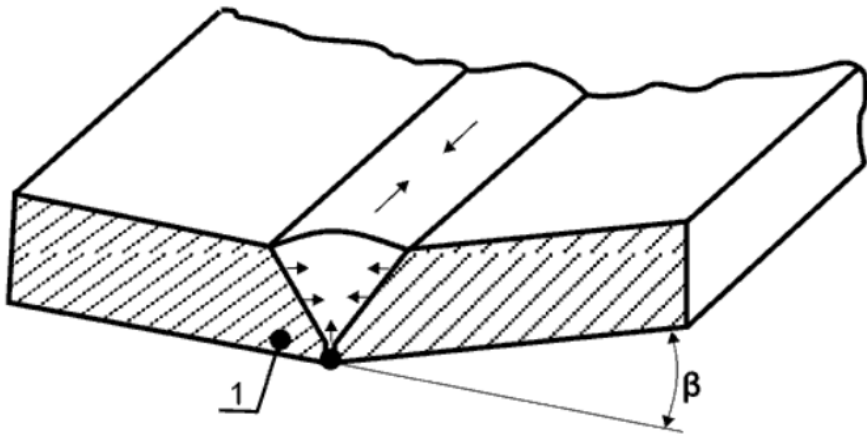
l – długość spoiny [mm]

E – moduł Younga $2,1 \cdot 10^5$ MPa

A – pole przekroju elementu spawanego [mm²]

2.2.3. Odkształcenia kątowe w połączeniach spawanych

Odkształcenia o charakterze kątowym wywołane są skurczem spoiny w kierunku poprzecznym do osi spawania. Rys. 13 przedstawia kierunki działania sił odpowiedzialne za kątowe odkształcenie złącza doczołowego.



Rys. 13. Odształcenie kątowe – 1 – złącze spawane, β – kąt ugięcia po spawaniu

Podobnie jak w przypadku odkształceń wzdłużnych, kluczową rolę odgrywa w przypadku odkształceń kątowych kształt przygotowania rowka spawalniczego. Ograniczenie objętości spoiny poprzez przygotowanie brzegów na X lub 2U wraz z zastosowaniem odpowiedniej kolejności spawania umożliwia niemal całkowite zredukowanie odkształcenia kątowego. Dlatego też dla połączeń spawanych o grubości 20mm i więcej istnieje konieczność zastosowania dwustronnego ukosowania w miejsce ukosowania na kształt litery V. W przypadku złączy teowych ze spoiną pachwinową, kluczowym elementem w kontekście odkształcenia kątowego jest to czy spoina pachwinowa jest obustronna i spawana w odpowiedniej kolejności, a także wielkość samych spoin [32, 80, 81, 83, 84].

2.3. Czynniki decydujące o stanie naprężeń i odkształceń spawalniczych

Mechanizmy decydujące o odkształceniach i naprężeniach w konstrukcjach spawanych są rezultatem oddziaływania wielu czynników.

2.3.1. Projektowanie konstrukcji spawanej

Proces projektowania koncepcji i docelowego rozwiązania wykonawczego ma istotny wpływ na okoliczności, w których w istotny sposób mogą wystąpić sprzyjające warunki do powstania nadmiernych odkształceń i naprężeń spawalniczych. Jedną z fundamentalnych zasad przy tworzeniu projektu konstrukcji spawanej jest cel jakim jest ograniczenie do niezbędnego minimum ilości połączeń spawanych w projektowanym obiekcie [6].

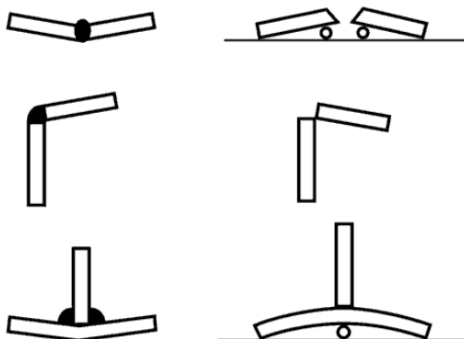
Kolejnym z kroków optymalizacji jest zastosowanie elementów kształtowych takich jak rury, odkuwki i inne kształtowniki, których geometria znacznie obniża ilość połączeń koniecznych do wykonania. Przykładem takiego rozwiązania jest zastosowanie dwuteownika w wersji walcowanej, który stanowi dobry przykład w kontekście alternatywnych rozwiązań z większą ilością spawania jak dwuteowniki gdzie środek jest spawany czterema spoinami pachwinowymi lub dwoma spoinami czołowymi z pasami [4].

W przypadku projektowania konstrukcji należy również pamiętać o tym aby dostęp do spawania był łatwy i aby stosować jeśli to możliwe spawanie obustronne. Zastosowanie spawania jednostronnego powoduje, że proces montażu i szepiania jest utrudniony, a sam proces spawania jest powodem pojawienia się

dodatkowych momentów gnących w konstrukcji wynikających z niesymetrycznego występowania skurczu spawalniczego, a w konsekwencji znacznych odkształceń. Odkształcenia takie mogą zostać ograniczone poprzez zastosowanie i zaplanowanie oprzyrządowania spełniającego rolę usztywnienia, a przez to stanowiące przeciw odkształcenie [8, 27].

2.3.2. Technika spawania

Pomimo dobrze zaprojektowanej dokumentacji wykonawczej należy również brać pod uwagę samą technikę wykonywania prac spawalniczych. Wśród najczęściej wykorzystywanych metod ograniczania odkształceń jest ustawianie części do spawania tak aby stanowiło to wstępne przeciw odkształcenie Rys. 14.

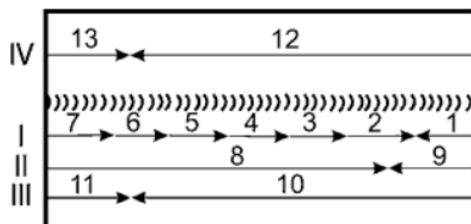


Rys. 14. Z lewej strony przedstawione są trzy przykłady odkształceń spawalniczych, a ze strony prawej sposób wstępnego ustawienia zapobiegającego odkształceniom [5]

Aby rozwiązania przedstawione na Rys. 14 przyniosły oczekiwane efekty, powinny być wykonane w przeciwnym kierunku do kierunku odkształceń. Złącze doczołowe spawane jednostronnie na

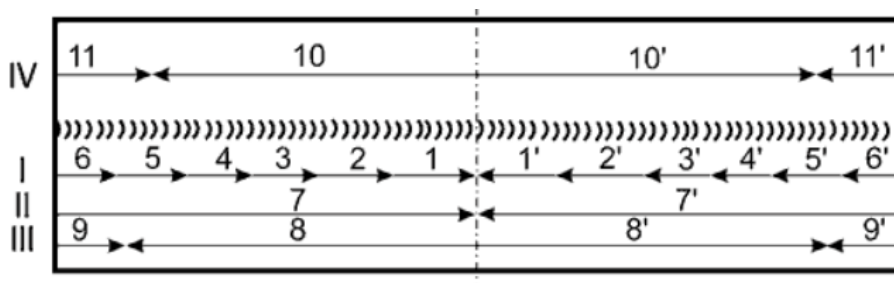
„V” należy ustawić tak aby kąt ukosowania był bardziej rozwarty niż założony w instrukcji technologicznej spawania co po spawaniu będzie skutkowało ograniczonym stopniem odkształcenia.

Poprawna realizacja prac spawalniczych mająca na celu redukcję odkształceń związana jest także z przygotowaniem złącza od samego początku. Podczas montażu należy bezwzględnie przestrzegać odstępu między brzegami łączonych elementów, krótkie złącza spawane można wykonywać prostymi ściegami z jednego do drugiego końca połączenia. W przypadku dłuższych złączy należy je wykonać odcinkowo/krokowo. Celem takiego podejścia jest utrzymywanie odstępu między brzegami elementów spawanych, a także ograniczenie wypaczania się elementów. W zależności od grubości elementów konstrukcji, powinno się stosować kolejność, w której spoiny doczołowe elementów o największej grubości są wykonywane w pierwszym etapie, a następnie cieńsze, kończąc na spawaniu spoin pachwinowych i usztywnień, począwszy od środka na zewnątrz w każdym z kierunków [25]. Powodem takiej kolejności jest fakt iż detale o największej grubości i znajdujące się najdalej od osi obojętnej odkształcają się w największym stopniu podczas procesu spawania [72]. W przypadku spawania elementów z segmentów o długości przekraczającej 250-300mm należy także przestrzegać kolejności wykonywania ściegów, Rys. 15.



Rys. 15. Etapy wykonywania poszczególnych warstw oznaczone są rzymskimi cyframi I-IV, arabskie cyfry 1-13 przedstawiają sekwencję wykonywania poszczególnych ściegów [5]

W przypadku elementów o długości 1000mm i większej spawanych z segmentów kolejność układania warstw i ściegów może okazać się niewystarczająca i wówczas należy przewidzieć wykonywanie spawania z udziałem dwóch i więcej spawaczy. Taki przypadek i sekwencję spawania przedstawia Rys. 16.



Rys. 16. Etapy wykonywania poszczególnych warstw oznaczone są rzymskimi cyframi I-IV, arabskie cyfry 1-11' przedstawiają sekwencję wykonywania poszczególnych ściegów przez poszczególnych spawaczy jednocześnie [5]

Sekwencja wykonywania ściegów i warstw może zostać również wsparta za pośrednictwem wspomnianego wcześniej przeciw odkształcenia oraz zastosowania tzw. ujemnej strzałki ugięcia, Rys. 17.

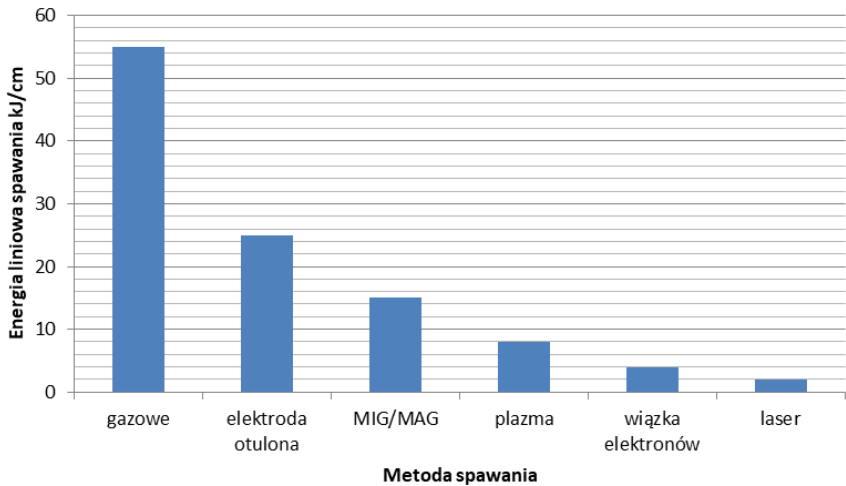


Rys. 17. Ustawienie do spawania bardzo długich lub bardzo szerokich elementów. 1 – elementy spawane, 2 – podbudowa kompensacyjna, F – siła wynikająca z docisku elementami technologicznymi, f – przewidywana strzałka ugięcia elementów spawanych [5]

Efekt tzw. strzałki ugięcia może osiągnąć od 1mm/metr aż po kilkadziesiąt milimetrów całościowej strzałki ugięcia dla bardzo długich elementów spawanych [24]. Nawet w przypadku elementów wielkogabarytowych zastosowanie takiej techniki i oprzyrządowania jest warte do implementacji, a przede wszystkim dla tego, że ze względu na rozmiary, prostowanie poprzez obróbkę plastyczną na zimno jest niemożliwe ze względu na to, że nie ma urządzeń o takich rozmiarach. Prostowanie płomieniowe w przypadku bardzo szerokich lub/i bardzo długich elementów o stosunkowo małym przekroju (rzędu 10-20 mm) także nie przynosi dobrych rezultatów [28].

2.3.3. Proces spawania

Dobór metody spawania, a co z tym związane energia liniowa spawania i współczynnik sprawności cieplnej k , w zależności od zastosowanej metody, zostały przedstawione na Rys. 18.



Rys. 18. Porównanie energii liniowej w funkcji metody spawania [4]

Ilość wprowadzonego ciepła podczas spawania ma decydujące znaczenie na własności złącza spawanego, ale także na stan naprężeń i odkształceń pospawalniczych [65, 66, 67]. Zgodnie z ISO/TR 18491:2015 energię liniową należy obliczyć według wzoru (3) natomiast zgodnie z ISO/TR 17671:2002 ilość wprowadzonego ciepła należy obliczyć ze wzoru (4) uwzględniającego współczynnik k w zależności od metody spawania zgodnie Tabelą 3.

$$E = \frac{U \times I}{v} \times 10^{-3} [kJ/mm] \quad (3)$$

$$Q = k \frac{U \times I}{v} \times 10^{-3} [kJ/mm] \quad (4)$$

gdzie:

Q–ilość wprowadzonego ciepła

k–współczynnik sprawności cieplnej

U– napięcie łuku elektrycznego [V]

I– natężenie elektryczne [A]

v – prędkość spawania [mm/s]

Tabela 3. Współczynnik sprawności cieplnej k w zależności od procesu spawania łukowego [1n]

Numer procesu/rodziny procesów spawania zgodnie z PN-EN ISO 4063:2023	Współczynnik sprawności cieplnej
121	1,0
111	0,8
13	0,8
141	0,6
15	0,6

Biorąc pod uwagę składowe wzoru, który umożliwia obliczenie energii liniowej czy też ilości ciepła wprowadzonego do złącza spawanego ale również dane z Rys.18 i Tab. 3, można wyciągnąć wnioski, że przygotowanie procesu spawania powinno od samego początku zakładać dobre proporcje w zakresie energetyczności procesu, oczywiście nie zapominając o wydajności czy też dostępności wykwalifikowanej kadry spawalniczej [4, 31, 29, 64, 66, 69].

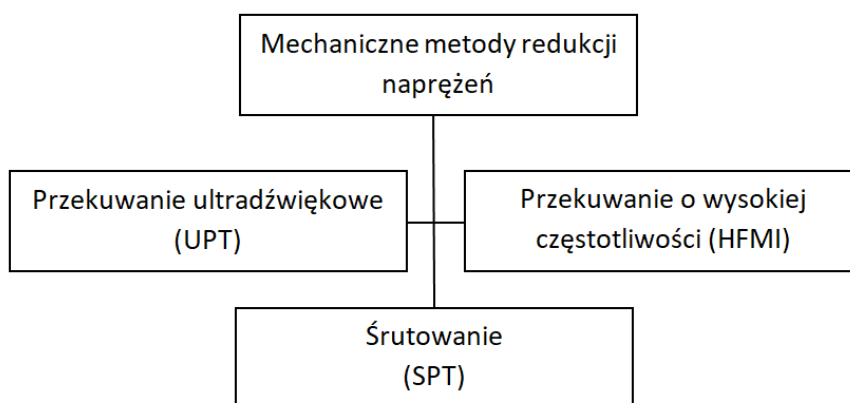
2.4. Metody redukcji naprężeń i odkształceń spawalniczych

Redukcja naprężeń i odkształceń spawalniczych może zostać podzielona na metody mechaniczne oraz termiczne. Do

mechanicznych zalicza się przekuwanie i śrutowanie. Do termicznych metod zalicza się obróbkę cieplną [14].

2.4.1. Mechaniczne metody redukcji naprężeń i odkształceń

Każda z metod podczas zastosowania wywołuje w materiale poddanym obróbce wprowadzenie naprężeń ściskających. Rys. 19 przedstawia zestawienie metod opisanych w literaturze, których zastosowanie zostało potwierdzone wynikami badań.



Rys. 19. Klasyfikacja najpowszechniej stosowanych metod odprężania materiałów metalowych [13, 15, 61, 17]

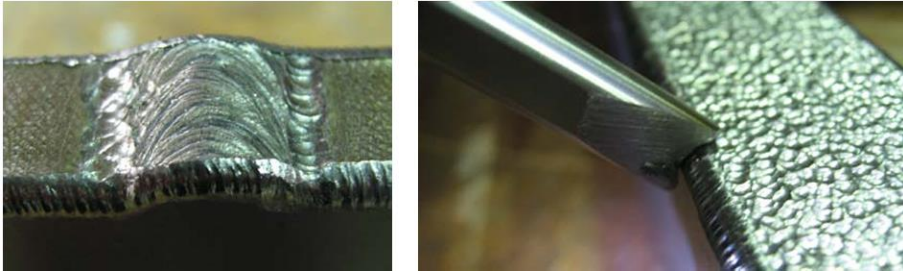
2.4.1.1. Przekuwanie

Metoda ta jest jedną z najpowszechniej stosowanych w przemyśle spawalniczym. Polega na przekuciu konstrukcji po spawaniu, głównie celem oczyszczenia z żuźla utworzonego w wyniku procesów cieplno-chemicznych w trakcie spawania [21]. Metodę tę można podzielić ze względu na napęd (może być pneumatyczny lub elektryczny) oraz sposób użycia (manualny lub zmechanizowany w przypadku powtarzalnych operacji). Narzędzia stosowane do napędów zwykle

przypominają dłuto zakończone kulistą końcówką z utwardzonej stali lub węglkowej końcówki. Proces posiada elementarną wadę w postaci braku precyzji i kontroli nad wykonywanym procesem ze względu na odrzut i energię uderzenia napędu [18, 58, 60].

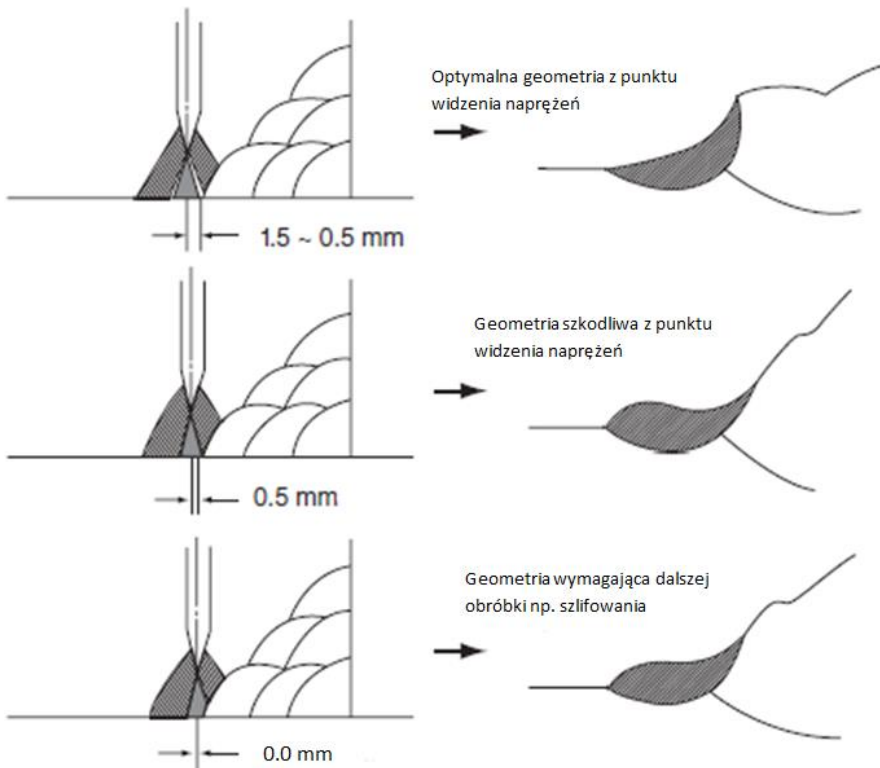
2.4.1.2. Przekuwanie o wysokiej częstotliwości – HFMI (z ang. *High Frequency Mechanical Impact*)

W porównaniu do klasycznego przekuwania urządzenia wykorzystywane w przypadku procesu HFMI są bardziej przyjazne dla użytkownika ze względu na wysoką częstotliwość pracy podczas przekuwania, która mieści się w zakresie 80-120 Hz. Ze względu na wysoką częstotliwość urządzenie umożliwia precyzyjną kontrolę nad procesem przy równoczesnym znacznie ograniczonym oddziaływaniu na operatora wykonującego operację przekuwania. Kolejną z zalet procesu HFMI jest to, że w rezultacie obróbki osiąga się powierzchnię o równomiernej mozaice, a spowodowane to jest niewielkimi odstępami pomiędzy odciskami w trakcie uderzeń [16]. Narzędzia wykorzystywane w procesie są bardzo podobne do tych wykorzystywanych w klasycznej obróbce przekuwania i wykonane są ze stali o wysokiej wytrzymałości, a ich geometria i kształt zależą od celu do osiągnięcia i dostępu do elementu. Narzędzia mogą być zakończone promieniem, ale także istnieje możliwość zastosowania narzędzi o wklęsłym kształcie dla usuwania ostrych krawędzi, Rys. 20 [19].



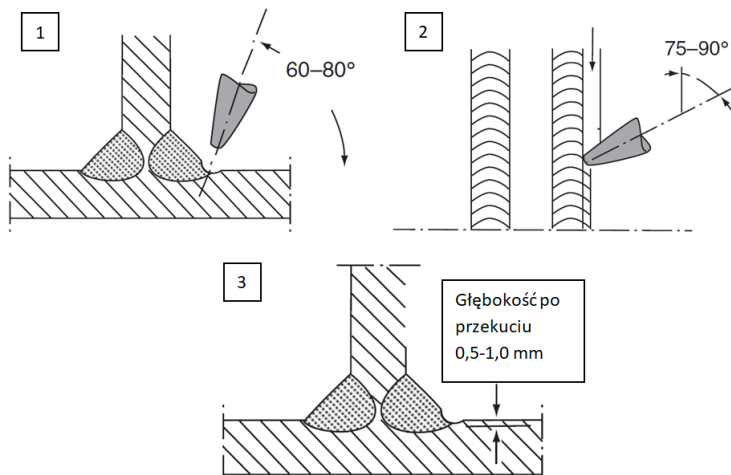
Rys. 20. Przykład złącza spawanego przekutego w obszarze linii wtopienia trzpieniem o sferycznym zakończeniu (po lewej) oraz wykorzystania trzpienia o wklęsłej geometrii do usuwania ostrych krawędzi (po prawej) [19]

Podstawowym zastosowaniem tej technologii jest zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej poprzez przekuwanie strefy wpływu ciepła wraz z linią wtopienia [55, 56]. Mechanizm, który towarzyszy zmniejszaniu koncentracji naprężeń polega na wprowadzeniu lokalnych naprężeń ściskających w obszarze poddanemu obróbce [50]. W przeciwieństwie do powszechnie stosowanej techniki szlifowania czy korekty geometrii spoin poprzez lokalne napawanie metodą TIG [59], które oddziałują na widoczną powierzchnię i topografię spoiny, ale równocześnie wprowadzają dodatkowy niekorzystny rozkład naprężeń w wyniku lokalnego skoncentrowanego cyklu cieplnego w przypadku napawania czy też obróbki mechanicznej w przypadku szlifowania [101]. Ze względu na ręczne wykonywanie prac oraz częstą konieczność wykonywania takich prac w pozycjach wymuszonych, może się on zakończyć niekorzystnym efektem, Rys. 21 [1].



Rys. 21. Efekt przetapiania linii wtopienia w funkcji odległości od spoiny [1]

Technika HFMI, zapewnia zmianę geometrii linii wtopienia jak również zmniejsza naprężenia szczątkowe [49]. Efekt zastosowania oraz technika wykonania HFMI przedstawia Rys. 22.

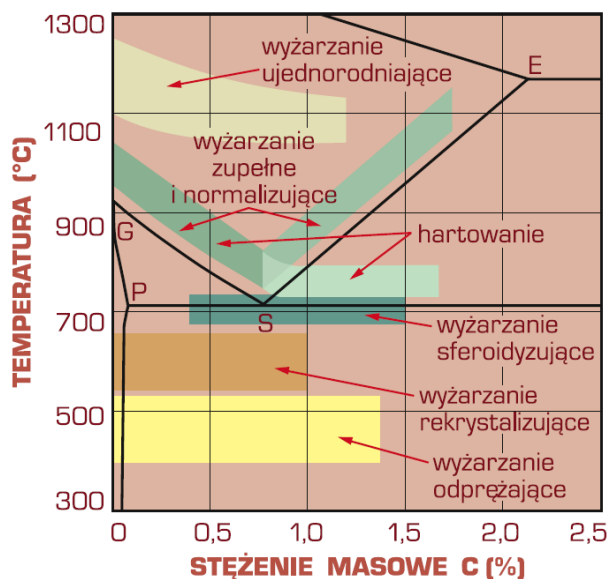


Rys. 22. Poprawna technika przekuwania linii wtopienia:
 1 - kątowna orientacja narzędzia względem materiału spawanego,
 2 – kątowna orientacja narzędzia względem osi spoiny,
 3 – efekt przekuwania [1]

W zależności od zastosowania, urządzenie jest wyposażone w różne długości i średnice trzpieni. W przypadku bardzo precyzyjnej obróbki wykorzystuje się trzpień o promieniu wierzchołka $R=1,5$ mm [51], natomiast do wysokowydajnej obróbki wykorzystuje się najczęściej trzpień o promieniach $R=2,0-2,5$ mm.

2.4.2. Obróbka cieplna

Technikę obróbki cieplnej można podzielić na wiele typów. Na Rys. 23 przedstawiono zakresy temperatur w zależności od rodzaju obróbki.



Rys. 23. Wycinek wykresu Fe-Fe₃C, z oznaczonymi zakresami temperatury wyżarzania i hartowania stali węglowych [22]

Z punktu widzenia odprężania i relaksacji konstrukcji po spawaniu najkorzystniejsze jest wyżarzanie odprężające. Wyżarzanie jest operacją obróbki cieplnej składającej się z nagrzania materiału do określonej temperatury (uzależnionej od procesu produkcyjnego materiałów podstawowych oraz ich gatunku), następnym wygrzaniem/wytrzymaniem w temperaturze wyżarzania oraz studzeniu w określonych warunkach jeśli chodzi o dynamikę. Celem tej obróbki cieplnej jest uzyskanie struktury zbliżonej do tej przed procesem spawania. W przypadku wyżarzania odprężającego nagrzanie stali polega na osiągnięciu temperatury niższej od A_{c1} , wygrzaniu w tej temperaturze i powolnym procesie chłodzenia [22]. Celem jak już wspomniano jest usunięcie naprężeń powstałych na skutek procesów odlewniczych, spawalniczych lub plastycznych i ciepłno-

plastycznych. To co jest charakterystyczne dla tej obróbki cieplnej to niemal zerowy wpływ na strukturę materiału poddanego procesowi. Przedziały dla temperatury i czasu procesu tej obróbki jest szeroki. Rodzaj stali konstrukcyjnej determinuje te parametry. Typowym zakresem wyżarzania odprężającego jest temperatura 530-650 °C [34, 71].

2.5. Podsumowanie przeglądu literatury

Obecność odkształceń oraz naprężeń wynikających z procesów spawania wiąże się z dwoma głównymi problemami: wymiarowymi, które mogą spowodować w najgorszym scenariuszu konieczność złomowania konstrukcji oraz zwiększenie kosztów produkcji ze względu na dodatkowe prace związane z korektą kształtu.

Przemysłową kontrolę odkształceń i naprężeń spawalniczych można uzyskać poprzez prowadzenie szczegółowych zapisów i stosowanie związanych z nimi wzorów empirycznych. Jak wskazano w przeglądzie literatury istnieją także technologiczne sposoby na ograniczanie lub niemal całkowite zredukowanie występowania odkształceń lub naprężeń.

Metodą, która może być zastosowana jako proces po zakończeniu prac spawalniczych (poza klasyczną obróbką cieplną – wyżarzania odprężającego) celem redukcji naprężeń i odkształceń spawalniczych może być również przekuwanie o wysokiej częstotliwości HFMI. W większości prezentowane i analizowane prace nie uwzględniają norm dotyczących kwalifikowania technologii spawania takich jak EN-ISO 15614-1 [6n] (same normy też nie odnoszą się do tego procesu jako do zmiennej istotnej), a zatem nie daje to możliwości

zastosowania technologii HFMI w procesie wytwarzania konstrukcji stalowych. W związku z tym, opracowanie technologii spawania wraz z weryfikacją w kontekście europejskich przepisów dotyczących kwalifikowania technologii spawania wraz ze szczegółową analizą skutków zastosowania techniki HFMI w kontekście redukcji odkształceń i naprężeń spawalniczych jest niezwykle istotne w aspekcie wdrożenia tej technologii w zastosowaniach przemysłowych.

3. Praca własna

3.1. Teza i cel pracy

Poprzez odpowiedni dobór metody redukcji naprężeń i odkształceń oraz parametrów procesu przekuwania o wysokiej częstotliwości, istnieje możliwość redukcji naprężeń i odkształceń powstających w złączach spawanych stali konstrukcyjnych pozwalając na uzyskanie złączy o akceptowalnej i określonej normami jakości oraz wytrzymałości.

Celem nadrzędnym niniejszej pracy było opracowanie technologii przekuwania o wysokiej częstotliwości w trakcie i po procesie spawania. W związku z częstą koniecznością redukcji skutków spawania na konstrukcjach, które nie mogą być poddane innym metodą relaksacji, działania prowadzone w ramach realizacji doktoratu wdrożeniowego zostały zorientowane w tym właśnie kierunku. Opracowanie tej technologii otwiera nowe możliwości w zakresie wspomagającej metodyki w przypadku konieczności wykonania napraw spawalniczych na elementach po finalnej obróbce cieplnej i/lub mechanicznej. Jednocześnie technologia ta ma stać się wiarygodna ze względu na jej konsekwencje, ponieważ jej dotychczasowa implementacja w porozumieniu z Klientami bardzo często kończyła się niepowodzeniem ze względu na brak usystematyzowanej wiedzy i uptylarnych wyników, czy też nie jest opisana przez żadną z norm. Z tego punktu widzenia realizacja wyżej nakreślonego celu zapewni firmie FAMET S.A. technologiczne możliwości produkcyjne niezbędne do wytwarzania wyrobów w

sposób zgodny ze specyfikacjami Klientów czy też własną dokumentacją, co stanowi strategiczny element przyszłej działalności Firmy. Aby to osiągnąć, wyszczególniono następujące cele naukowe i technologiczne stanowiące jego elementy składowe:

3.2. Cele naukowe:

- 1) Określenie wpływu technologii przekuwania HFMI na strukturę i właściwości mechaniczne złączy spawanych szerokiej grupy stali konstrukcyjnych;
- 2) Określenie wpływu technologii przekuwania HFMI na stan naprężeń złączy spawanych;
- 3) Określenie wpływu technologii HFMI na stan odkształceń złączy spawanych.

3.3. Cele technologiczne:

- 1) Wyznaczenie optymalnych parametrów procesu przekuwania międzyściegowego oraz po spawaniu;
- 2) Określenie wpływu przekuwania o wysokiej częstotliwości na możliwość kwalifikowania technologii spawania łukowego;
- 3) Opracowanie technologii przekuwania mającego w przyszłości stanowić know-how firmy FAMET S.A.

Zarówno cele naukowe jak i technologiczne zostały zaplanowane do realizacji w firmie FAMET S.A. przy współpracy z Katedrą Spawalnictwa Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach oraz zewnętrznymi podmiotami,

dzięki którym realizacja badań i analiza wyników badań były możliwe.

3.4. Metody eksperymentalne

Aby osiągnąć cele naukowe i technologiczne, do badań wykorzystano stale konstrukcyjne o grubości 10 mm dla doczołowych złączy spawanych oraz o grubości 20 mm dla złączy teowych. Następnie na drodze spawania zrobotyzowanego w przypadku złączy doczołowych i spawania częściowo zmechanizowanego w przypadku złączy teowych przygotowano 30 płyt próbnych.

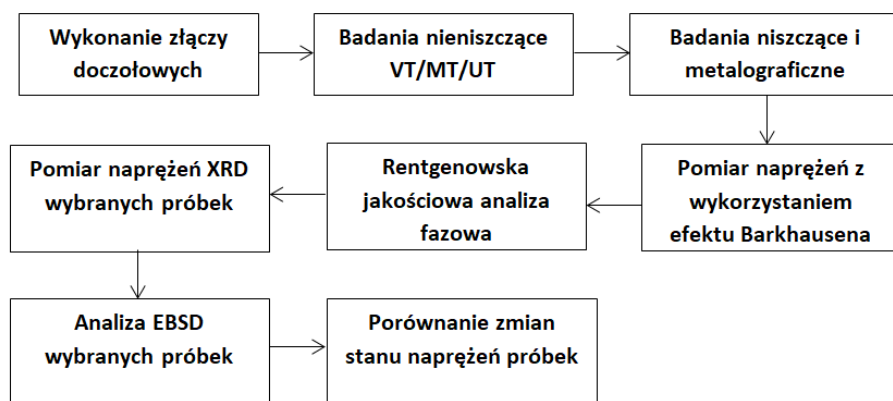
Każda grupa stali konstrukcyjnych została poddana odpowiednio: procesowi spawania, procesowi spawania i następnie obróbce cieplej – wyżarzaniu odprężającemu, a także procesowi spawania i przekuwania międzyścięgnowego o wysokiej częstotliwości.

Po przeprowadzeniu spawania i zakończeniu procesów towarzyszących, wykonano badania nieniszczące VT, MT oraz UT (tylko dla złączy doczołowych), mające na celu weryfikację jakości uzyskanych złączy spawanych. W zakresie badań niszczących wykonano dla złączy doczołowych: rozciąganie poprzeczne, zginanie poprzeczne, badanie udarność, badanie twardości HV10, badanie makroskopowe oraz mikroskopowe. Dla złączy teowych wykonano: badanie makroskopowe.

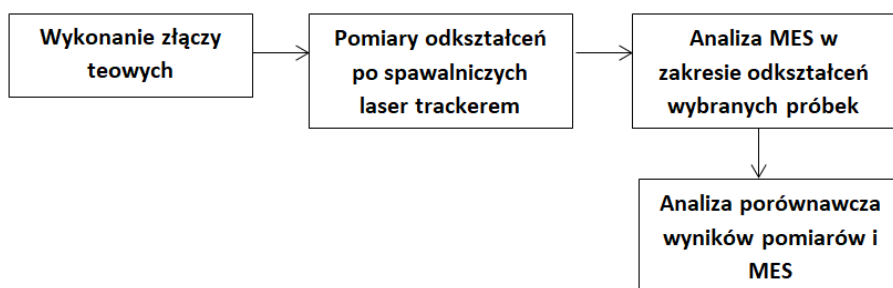
Dopełnieniem uzyskanych wyników badań standardowych było wykonanie dla wybranych złączy doczołowych: pomiaru naprężeń z wykorzystaniem efektu Barkhausena, rentgenowskiej analizy składu fazowego, pomiaru naprężeń z wykorzystaniem dyfrakcji rentgenowskiej, analizę orientacji krystalograficznej ziaren i faz EBSD. Dla złączy teowych przeprowadzono bardzo precyzyjne

pomiary odkształceń pospawalniczych z wykorzystaniem laser trackera oraz dla wybranych próbek została przeprowadzona porównawcza analiza z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

Zaplanowany cykl procedowania prób technologicznych i badań został przedstawiony w formie graficznej, (Rys 24 i 25).



Rys. 24. Przebieg realizacji i badań na złączach doczołowych w różnych warunkach technologicznych



Rys. 25. Przebieg realizacji i badań na złączach teowych w różnych warunkach technologicznych

Wyszczególnione powyżej badania i pomiary stanowią komplementarny zakres umożliwiający na praktyczną ewaluację

możliwości wdrożenia opracowanej technologii obróbki w trakcie spawania w procesach wytwarzania konstrukcji zaprojektowanych ze stali konstrukcyjnych.

3.5. Materiały użyte do badań

Do zrealizowania badań użyto pięciu gatunków stali konstrukcyjnej. Były to stale: S235JR, S355J2+N, S460NL, S690QL oraz S960QL. Ponadto wykorzystano 3 typy materiałów dodatkowych do spawania w zależności od tego jaki materiał podstawowy był spawany. Dla stali S235JR, S355J2+N i S460NL był to drut spawalniczy o średnicy 1,2 mm o handlowej nazwie IMT-2, dla stali S690QL był to drut spawalniczy o średnicy 1,2 mm o handlowej nazwie IMT NiMoCr oraz dla stali S960QL był to drut o średnicy 1,2 mm o handlowej nazwie ED-FK 1000. Składy chemiczne poszczególnych materiałów zostały przedstawione w tabelach 4÷11.

Tabela 4. Wagowy skład chemiczny spawanego materiału S235JR

Skład chemiczny [%]							
S235JR	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
	0,13	0,53	0,2	0,008	0,012	0,04	0,01
	Ni	V	Cu	Al	Ti	Nb	N
	0,061	0,002	0,15	0,035	0,001	0,002	0,009

Tabela 5. Wagowy skład chemiczny spawanego materiału
S355J2+N

Skład chemiczny [%]							
S355J2+N	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
	0,12	1,45	0,17	0,015	0,006	0,04	0,005
	Ni	V	Cu	Al	Ti	Nb	As
	0,03	0,005	0,05	0,034	0,005	0,042	0,005

Tabela 6. Wagowy skład chemiczny spawanego materiału
S460NL

Skład chemiczny [%]							
S460NL	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
	0,16	1,57	0,46	0,011	0,001	0,04	0,003
	Ni	V	Cu	Al	Ti	Nb	N
	0,50	0,09	0,17	0,029	0,003	0,03	0,011

Tabela 7. Wagowy skład chemiczny drutu spawalniczego IMT-2

Skład chemiczny [%]						
IMT-2 Ø1,2mm	C	Mn	Si	P	S	Cr
	0,069	1,441	0,875	0,007	0,017	0,066
	Ni	V	Cu	Al	Mo	Ti+Zr
	0,063	0,003	0,074	0,002	0,014	0,0095

Tabela 8. Wagowy skład chemiczny spawanego materiału
S690QL

Skład chemiczny [%]							
S690QL	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
	0,05	1,54	0,28	0,008	0,002	≤ 1,5	0,12
	Ni	V	Cu	Al	Ti	Nb	N
	-	≤ 0,012	≤ 0,5	-	≤ 0,05	0,041	≤ 0,015

Tabela 9. Wagowy skład chemiczny drutu spawalniczego IMT
NiMoCr

Skład chemiczny [%]						
IMT NiMoCr Ø1,2mm	C	Mn	Si	P	S	Cr
	0,08	1,64	0,57	0,01	0,008	0,34
	Ni	V	Cu	Al	Mo	Ti+Zr
	1,46	0,09	0,01	0,003	0,27	0,002

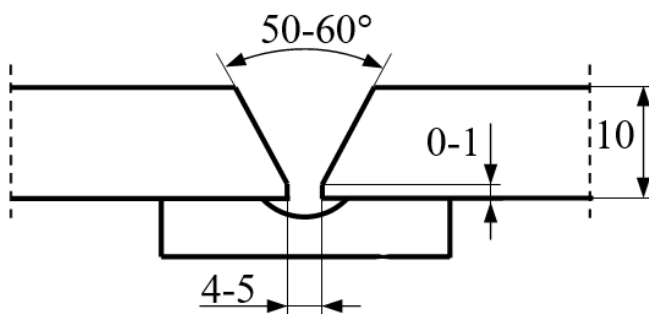
Tabela 10. Wagowy skład chemiczny spawanego materiału
S960QL

Skład chemiczny [%]							
S960QL	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
	0,12	1,42	0,47	0,008	0,003	0,59	0,56
	Ni	V	Cu	Al	Ti	Nb	As
	0,79	0,05	0,11	0,007	0,005	0,02	0,002

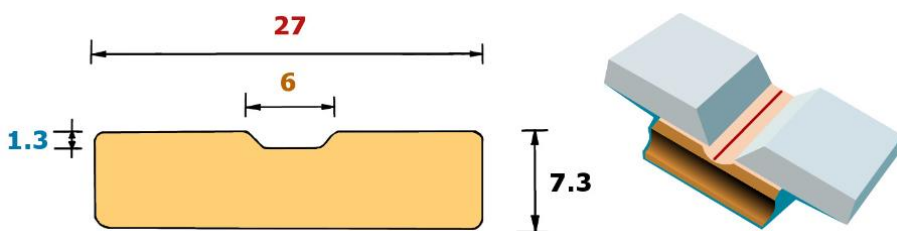
Tabela 11. Wagowy skład chemiczny drutu spawalniczego ED-
FK 1000

Skład chemiczny [%]						
ED-FK 1000 Ø1,2mm	C	Mn	Si	P	S	Cr
	0,11	1,75	0,81	0,007	0,009	0,36
	Ni	V	Cu	Al	Mo	Ti+Zr
	2,24	0,002	0,009	0,005	0,57	0,08

Dla złączy doczołowych elementy próbne o wymiarach 10 x 150 x 600mm (na każdą z płyt próbnych przeznaczone były dwie takie blachy z wykonanym ukosowaniem na 1/2V) były przygotowane do spawania zgodnie z Rys. 26:

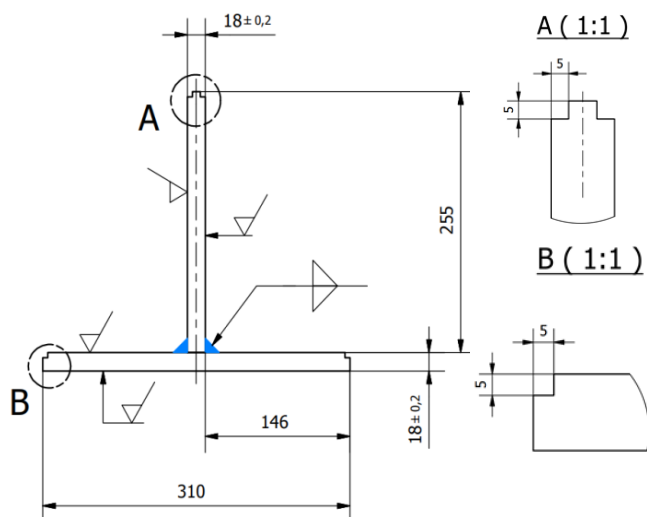


Rys. 26. Schemat przygotowania do spawania złącza doczołowego wykorzystane ze względu na zapewnienie poprawnego przetopienia i formowania ściegu graniowego spoiny czołowej spawanej jednostronnie na zrobotyzowanym stanowisku.



Rys. 27. Podkładka ceramiczna zastosowana do spawania na stanowisku zrobotyzowanym

Dla złączy teowych elementy próbne o wymiarach 18 x 310 x 450mm oraz 18 x 255 x 450mm (początkowa grubość blach wynosiła 20 mm przed frezowaniem wyrównującym) były przygotowane do spawania zgodnie z Rys. 28:



Rys. 28. Przygotowanie złącza teowego do spawania i pomiarów odkształceń

Wszystkie blachy wykonano z tego samego materiału reprezentującego poszczególne gatunki, a po wycięciu tlenowym poddano je obróbce skrawaniem ze wszystkich stron aby uzyskać jak najniższą odchyłkę płaskości i jednakowe wymiary przed rozpoczęciem spawania. Zarówno w płycie poziomej jak i pionowej wykonano podcięcia służące do pomiarów odchyłek prostoliniowości oraz odkształceń końców blach po spawaniu i dalszych obróbkach.

3.6. Spawanie doczołowych złączy próbnych

Proces spawania przeprowadzono na stanowisku zrobotyzowanym firmy CLOOS (Rys 29) celem zapewnienia porównywalnych parametrów spawania dla każdej z płyt próbnych takich jak np.: napięcie łuku, natężenie prądu spawania, ilość ściegów, prędkość spawania, gaz osłonowy M20 (92% Ar + 8% CO₂), czy

odległość końcówki prądowej od elementu spawanego zwanego wolnym wylotem elektrody.



Rys. 29. Płyta próbna z podkładką ceramiczną zamontowaną na stole robota spawalniczego

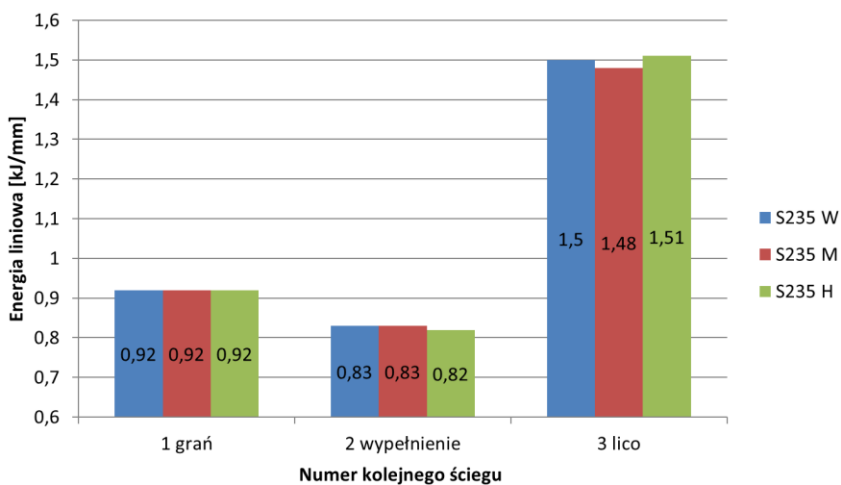
Próbki oznaczono dla identyfikacji SXXXW, SXXXM oraz SXXXH, gdzie S oznacza stal konstrukcyjną, XXX oznacza kolejną grupę jeśli chodzi o minimalną granicę plastyczności oraz W – próbka w stanie po spawaniu, M – próbka w stanie po przekuwaniu międzyściegowym i H – próbka w stanie po przekuwaniu i pospawalniczej obróbce cieplnej – wyżarzanie odprężające. Parametry spawania zostały zarejestrowane przez operatora stanowiska spawalniczego, a każda z płyt została pospawana na trzy ściegi. Zestawienie energii liniowej wprowadzonej do każdego ze złączy przedstawiono tabelarycznie. Ze względu na przekuwanie każdego ze ściegów w kolejnych tabelach przedstawiono także porównanie temperatur międzyściegowych dla poszczególnych złączy, Tablice 12-26 oraz Rysunki 30-39. W przypadku złączy przekuwanych temperatura po każdym wykonanym ściegu była niższa od analogicznych ściegów na pozostałych płytach próbnych ze względu

na czas potrzebny do przekucia całej powierzchni warstwy spawalniczej.

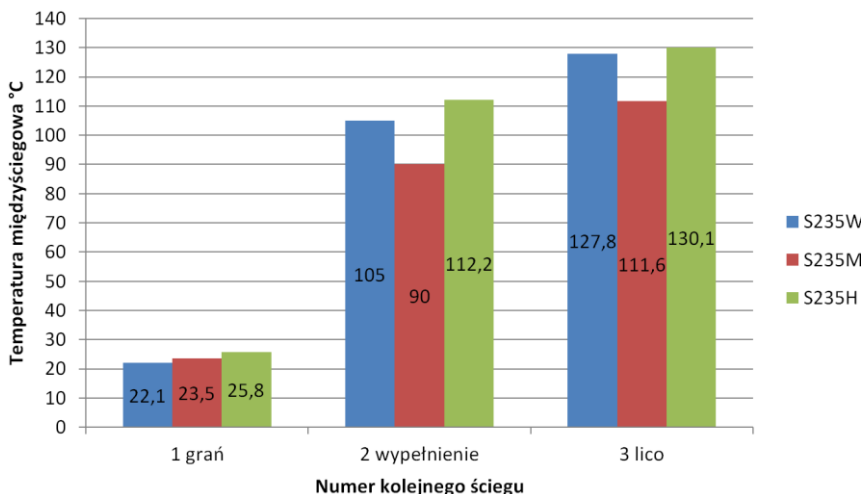
Tabela 12. Zastosowane parametry spawania stali S235JR

L.p.	Nr ściegu	T_m [°C]	I_{sr} [A]	U_{sr} [V]	t_w [min]	Q [kJ/mm]
S235W	1 (grań)	22,1	188	24,2	2:31	0,92
	2 (środek)	105,0	219	26,6	1:47	0,83
	3 (lico)	127,8	257	26,5	2:45	1,50
S235M	1 (grań)	23,5	190	24,1	2:31	0,92
	2 (środek)	90,0	220	26,7	1:46	0,83
	3 (lico)	111,6	256	26,6	2:43	1,48
S235H	1 (grań)	25,8	190	24,0	2:32	0,92
	2 (środek)	112,2	217	26,6	1:47	0,82
	3 (lico)	130,1	258	26,5	2:46	1,51

T_m - temperatura między ściegowa, I_{sr} - średnia wartość natężenia w trakcie spawania, U_{sr} - średnia wartość napięcia w trakcie spawania, t_w - czas spawania jednego ściegu, Q – energia liniowa spawania



Rys. 30. Zestawienie energii liniowej dla poszczególnych ściegów wykonanych ze stali S235JR

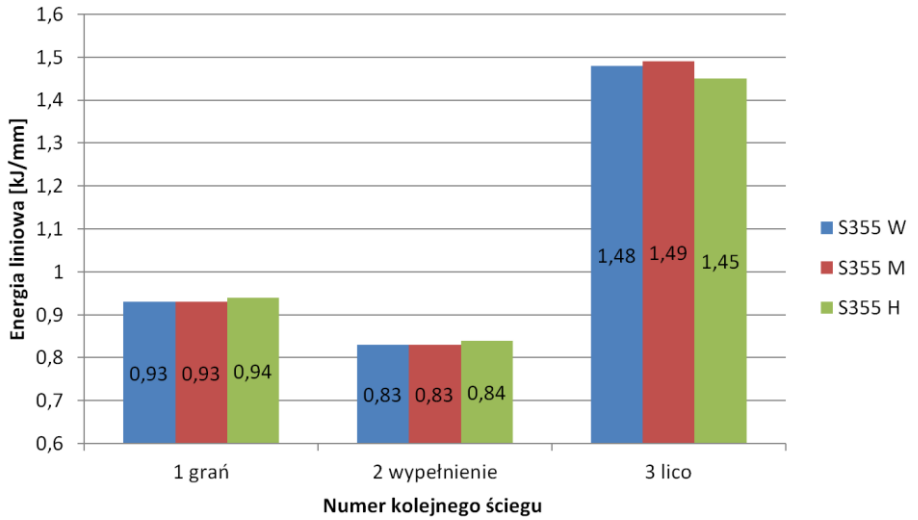


Rys. 31. Zestawienie temperatury międzyściegowej dla poszczególnych ściągu wykonanych ze stali S235JR

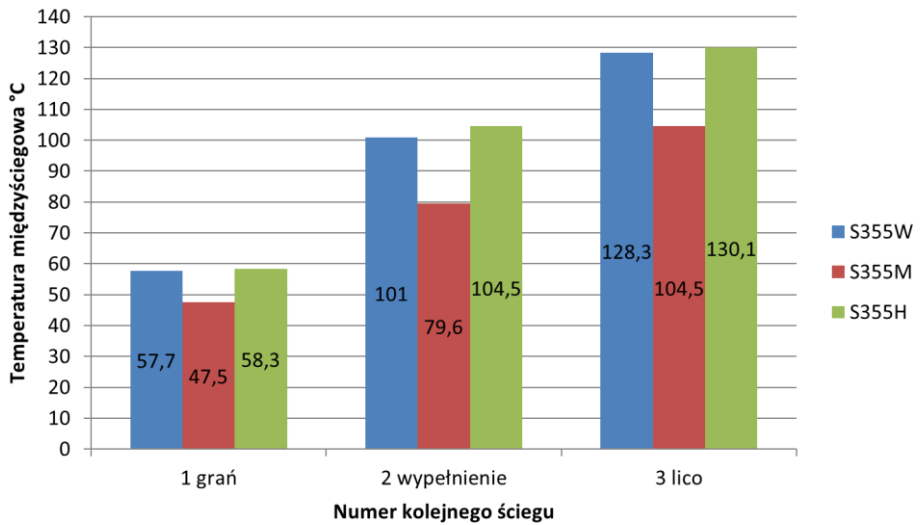
Tabela 13. Zastosowane parametry spawania stali S355J2+N

L.p.	Nr ściągu	T_m [°C]	I_{sr} [A]	U_{sr} [V]	t_w [min]	Q [kJ/mm]
S355W	1 (grań)	57,7	193	24,0	2:31	0,93
	2 (środek)	101,0	219	26,6	1:47	0,83
	3 (lico)	128,3	255	26,5	2:44	1,48
S355M	1 (grań)	47,5	192	24,1	2:31	0,93
	2 (środek)	79,6	220	26,7	1:46	0,83
	3 (lico)	104,5	257	26,6	2:43	1,49
S355H	1 (grań)	58,3	193	24,1	2:32	0,94
	2 (środek)	104,4	221	26,8	1:47	0,84
	3 (lico)	130,1	254	26,5	2:42	1,45

T_m - temperatura między ściągową, I_{sr} - średnia wartość natężenia w trakcie spawania, U_{sr} - średnia wartość napięcia w trakcie spawania, t_w - czas spawania jednego ściągu, Q - energia liniowa spawania



Rys. 32. Zestawienie energii liniowej dla poszczególnych ściegów wykonanych ze stali S355J2+N

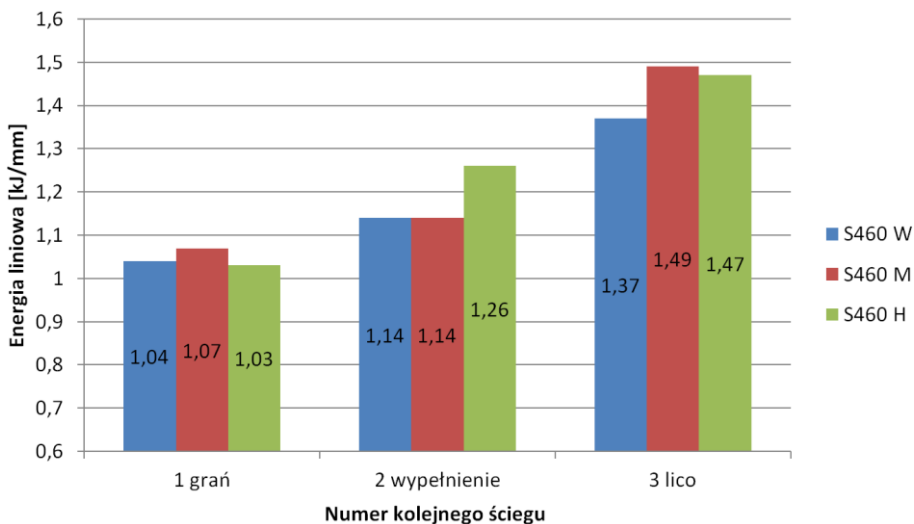


Rys. 33. Zestawienie temperatury międzysciegowej dla poszczególnych ściegów wykonanych ze stali S355J2+N

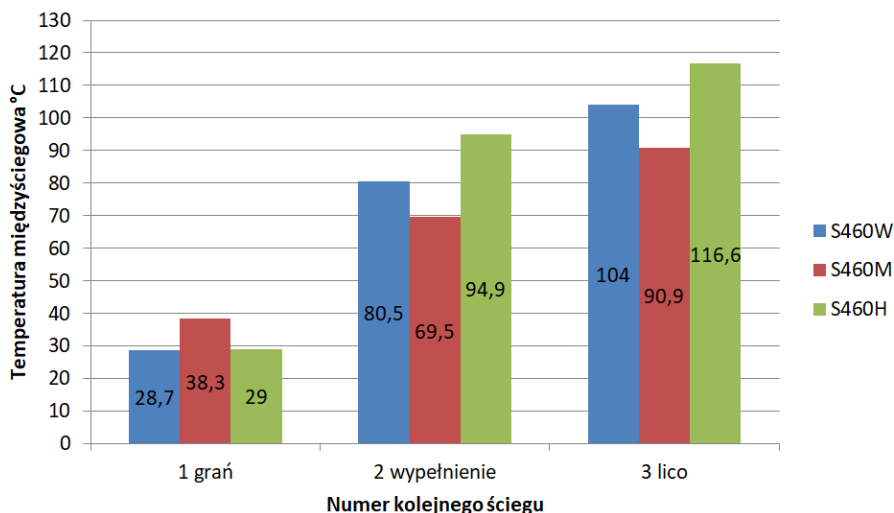
Tabela 14. Zastosowane parametry spawania stali S460NL

L.p.	Nr ściegu	T_m [°C]	I_{sr} [A]	U_{sr} [V]	t_w [min]	Q [kJ/mm]
S460W	1 (grań)	28,7	197	24,1	2:44	1,04
	2 (środek)	80,5	201	27,1	1:36	1,14
	3 (lico)	104,0	255	26,7	2:31	1,37
S460M	1 (grań)	38,3	198	24,4	2:45	1,07
	2 (środek)	69,5	203	27,2	1:35	1,14
	3 (lico)	90,9	255	26,6	2:44	1,49
S460H	1 (grań)	29,0	193	24,3	2:44	1,03
	2 (środek)	94,9	222	27,2	1:36	1,26
	3 (lico)	116,6	256	26,6	2:42	1,47

T_m - temperatura między ściegowa, I_{sr} - średnia wartość natężenia w trakcie spawania, U_{sr} - średnia wartość napięcia w trakcie spawania, t_w - czas spawania jednego ściegu, Q – energia liniowa spawania



Rys. 34. Zestawienie energii liniowej dla poszczególnych ściegów wykonanych ze stali S460NL

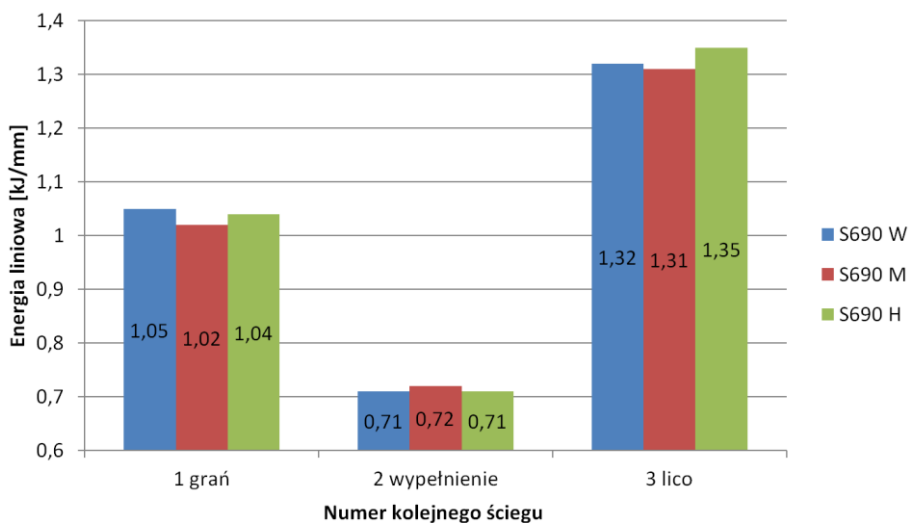


Rys. 35. Zestawienie temperatury międzyściegowej dla poszczególnych ściegów wykonanych ze stali 460NL

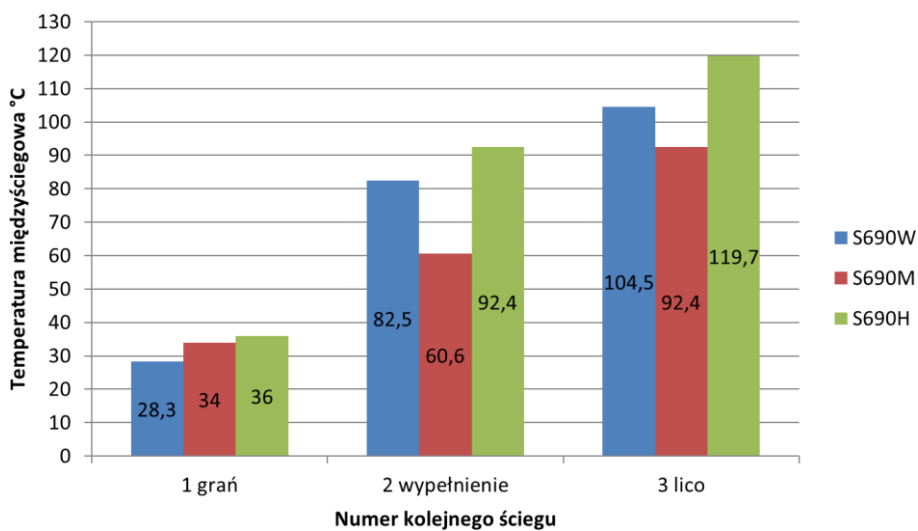
Tabela 15. Zastosowane parametry spawania stali S690QL

L.p.	Nr ściegu	T_m [°C]	I_{sr} [A]	U_{sr} [V]	t_w [min]	Q [kJ/mm]
S690W	1 (grań)	28.3	194	24.3	2:46	1.05
	2 (środek)	82.5	200	27.8	1:36	0.71
	3 (lico)	104.5	247	26.5	2:31	1.32
S690M	1 (grań)	34.0	192	24.2	2:44	1.02
	2 (środek)	60.6	202	27.4	1:37	0.72
	3 (lico)	98.5	250	26.4	2:29	1.31
S690H	1 (grań)	36.0	195	24.3	2:44	1.04
	2 (środek)	92.4	199	27.3	1:38	0.71
	3 (lico)	119.7	249	26.5	2:33	1.35

T_m - temperatura między ściegowa, I_{sr} - średnia wartość natężenia w trakcie spawania, U_{sr} - średnia wartość napięcia w trakcie spawania, t_w - czas spawania jednego ściegu, Q – energia liniowa spawania



Rys. 36. Zestawienie energii liniowej dla poszczególnych ściegów wykonanych ze stali S690QL

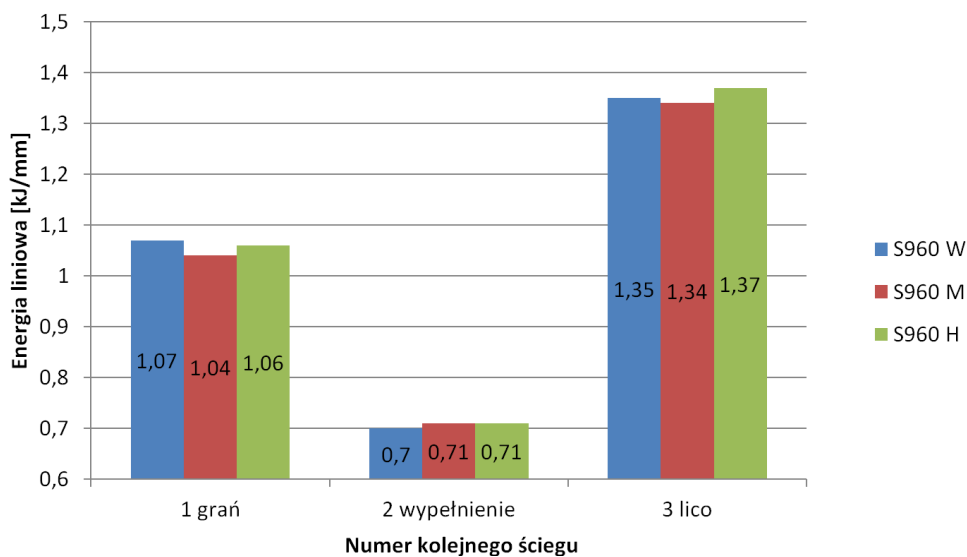


Rys. 37. Zestawienie temperatury między ściegowej dla poszczególnych ściegów wykonanych ze stali S690QL

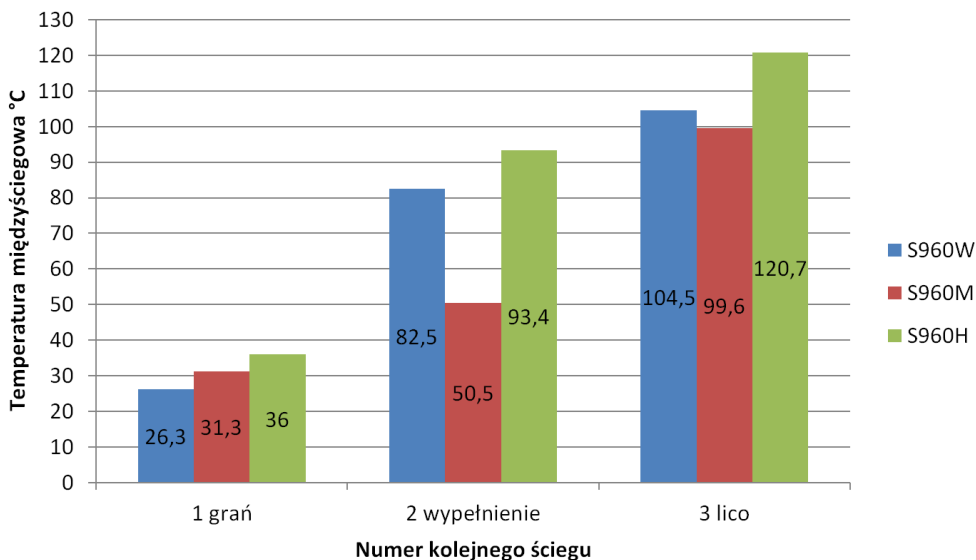
Tabela 16. Zastosowane parametry spawania stali S960QL

L.p.	Nr ściegu	T_m [°C]	I_{sr} [A]	U_{sr} [V]	t_w [min]	Q [kJ/mm]
S960W	1 (grań)	28,6	201	23,9	2:46	1,07
	2 (środek)	82,5	203	27,0	1:36	0,70
	3 (lico)	104,5	255	26,3	2:31	1,35
S960M	1 (grań)	31,3	200	23,8	2:44	1,04
	2 (środek)	50,5	202	27,1	1:37	0,71
	3 (lico)	99,6	255	26,3	2:29	1,34
S960H	1 (grań)	36,0	202	24,0	2:44	1,06
	2 (środek)	93,4	202	27,0	1:38	0,71
	3 (lico)	120,7	254	26,4	2:33	1,37

T_m - temperatura między ściegowa, I_{sr} - średnia wartość natężenia w trakcie spawania, U_{sr} - średnia wartość napięcia w trakcie spawania, t_w - czas spawania jednego ściegu, Q – energia liniowa spawania



Rys. 38. Zestawienie energii liniowej dla poszczególnych ściegów wykonanych w ramach próbek z S960QL



Rys. 39. Zestawienie temperatury międzyściegowej dla poszczególnych ściegów wykonanych ze stali S960QL

Tabele 12-16 oraz rysunki 30-39, przedstawiają parametry spawania dla każdego ze ściegów wykonanych na płytach próbnych. Osiągnięte wyniki zakresu energii liniowej dla każdego z poszczególnych ściegów świadczą o tym, że spawanie na stanowisku zrobotyzowanym pozwoliło na osiągnięcie prawie jednakowych warunków spawania. Jediną różnicę można zauważyć dla próbki z przekuwaniem każdego ze ściegów jeśli chodzi o temperaturę międzyściegową i jest ona niższa w porównaniu do pozostałych płyt próbnych, a wynika to z czasu pomiędzy spawaniem poszczególnych ściegów i stygnięciem podczas przekuwania. Do pomiaru temperatury międzyściegowej wykorzystano termometr stykowy o zakresie pomiarowym $-50 - 350^{\circ}\text{C}$, dokładności $\pm (1^{\circ}\text{C} \pm 1\%$ mierzonej wartości) i rozdzielczości $0,1^{\circ}\text{C}$.



Rys. 40. Płyta próbna S460M w trakcie pomiaru temperatury między ściegowej

3.6.1. Przekuwanie międzyściegowe HFMI

Przekuwanie o wysokiej częstotliwości (90 Hz) każdego wykonanego ściegu miało na celu zmniejszenie naprężeń w złączy spawanym poprzez wprowadzenie do niego naprężeń ściskających. Został do tego wykorzystany młot pneumatyczny Weld Line 10 firmy PITEC GmbH. Aby urządzenie działało skutecznie należy zapewnić ciśnienie w układzie sprężonego powietrza pomiędzy 4 a 7 bar. W trakcie wykonywania przekuwania ciśnienie wynosiło około 6,5 bar (Rys. 41).

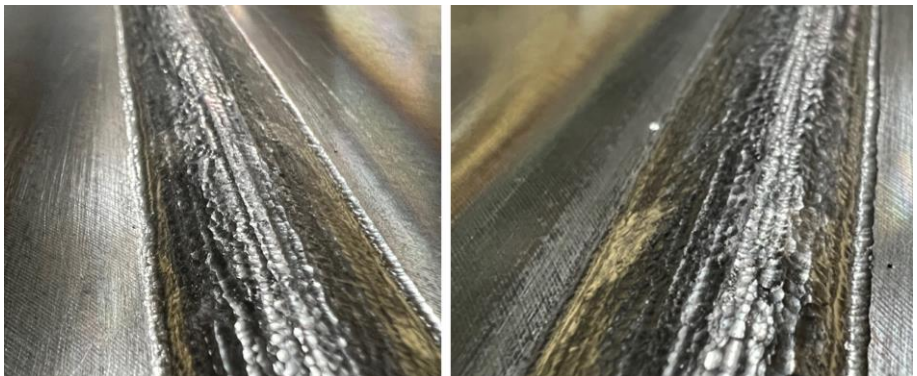


Rys. 41. Urządzenie Weld Line 10 (po lewej), wartość ciśnienia zasilającego urządzenie w trakcie przekuwania płyt próbnych (po prawej)

Poprawność przekuwania osiągnięto wówczas gdy 100% powierzchni każdego ściegu wraz z licem zostało poddane obróbce urządzeniem Weld Line 10 wyposażonym w trzpień o długości 80 mm i promieniu wierzchołka $R=2\text{mm}$, a sama obróbka prowadzona była ręcznie z prędkością od 30 cm/minutę dla złączy ze stali S235JR, S355J2+N oraz S460NL do 20 cm/minutę dla złączy ze stali S690QL oraz S960QL (Rys. 42 i 43).



Rys. 42. Płyta próbna S960M w trakcie przekuwania (po prawej),
 ścieg Nr 2 (wypełnienie) po przekuciu całej powierzchni
 (po lewej)

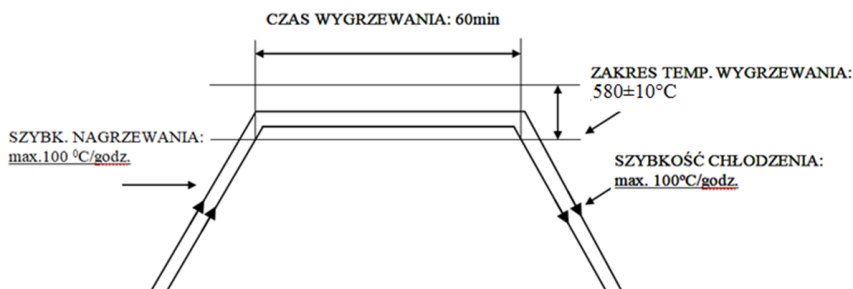


Rys. 43. Spoina płyty próbnej S960M po przekuwaniu ściegu
 Nr 3 (lico)

3.6.2. Obróbka cieplna złącza spawanego

Każda z płyt oznaczonych „H” po spawaniu na stanowisku zrobotyzowanym i badaniach nieniszczących została poddana pospawalniczej obróbce cieplnej celem redukcji naprężeń i odkształceń powstałych w wyniku procesów spawalniczych. Proces wyżarzania odprężającego przeprowadzony został z wykorzystaniem

oporowych mat grzewczych gwarantujących bardzo stabilne warunki obróbki cieplnej i dzielił się na trzy etapy: kontrolowane nagrzewanie, wygrzanie oraz kontrolowane chłodzenie, (Rys. 44).



Rys. 44. Przebieg wyżarzania odpężającego każdej z płyt oznaczonych literą H

3.7. Spawanie złączy teowych

Proces spawania przeprowadzono ręcznie z wykorzystaniem metody MAG (135). Wszystkie złącza spawane zostały wykonane przez jednego spawacza celem zapewnienia porównywalnych parametrów spawania dla każdej z płyt próbnych takich jak np.: napięcie łuku, natężenie prądu spawania, ilość ściegów, prędkość spawania czy odległość końcówki prądowej od elementu spawanego (wolny wylot elektrody). Parametry spawania zostały zarejestrowane przez rejestrator parametrów spawalniczych (System EWM Xnet 2.1), a każda z płyt została pospawana do uzyskania spoiny pachwinowej o wymiarze minimum a12 z obu stron. Jako osłonę metalurgiczną zastosowano mieszankę gazów M20 (92% Ar + 8% CO₂). Próbkę oznaczono dla identyfikacji A÷E + 1÷3, , gdzie A – S235JR, B – S355J2+N, – C – S460NL, D – S690QL, E – S960QL, a cyfry 1, 2, 3 oznaczają: 1 – próbka w stanie po spawaniu, 2 – próbka w stanie po przekuwaniu między ściegowym i 3 – próbka w stanie po

przekuwaniu i pospawalniczej obróbce cieplnej – wyżarzanie odprężające. Zestawienie parametrów spawania i przede wszystkim energii liniowej wprowadzonej do każdego ze złączy przedstawiono tabelarycznie, Tablice 17-32 i Rysunki 45-49 Spawanie było wykonywane jednocześnie dla wszystkich trzech płyt z danego gatunku i w związku z tym temperatura międzyścięgowa nie przekroczyła 40°C podczas pomiaru termometrem stykowym.

Tabela 17. Zastosowane parametry spawania stali S235JR dla próbki w stanie bez obróbki

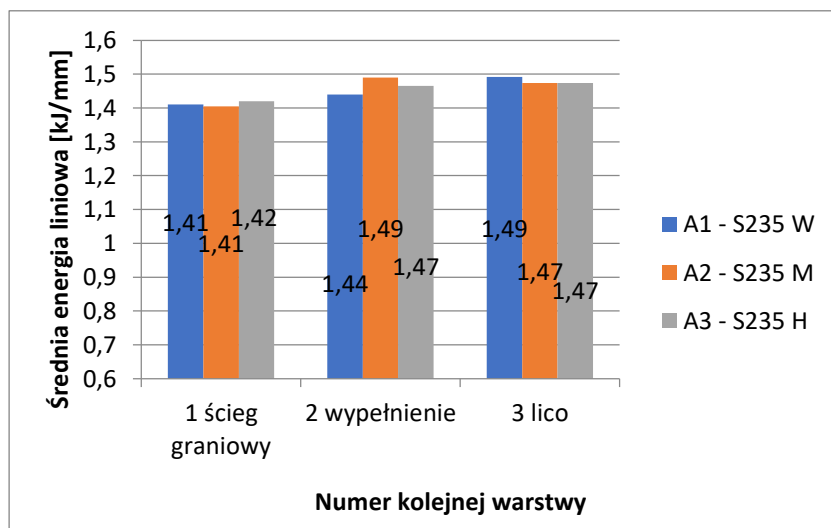
Lp.	Nr ściegu	I _{sr} [A]	U _{sr} [V]	t _w [min]	Q [kJ/mm]
A1 S235W	Warstwa 1 - 1 strona	279	27,6	1,33	1,37
	Warstwa 1 - 2 strona	282	27,6	1,40	1,45
	Warstwa 2 - 1 strona	277	27,6	1,42	1,44
	Warstwa 2 - 2 strona	276	27,6	1,42	1,44
	Warstwa 2 - 1 strona	276	27,6	1,42	1,44
	Warstwa 2 - 2 strona	277	27,6	1,42	1,44
	Warstwa 3 - 1 strona	280	27,6	1,50	1,55
	Warstwa 3 - 2 strona	276	27,6	1,42	1,44
	Warstwa 3 - 1 strona	281	27,6	1,48	1,53
	Warstwa 3 - 2 strona	280	27,6	1,50	1,55
	Warstwa 3 - 1 strona	276	27,6	1,42	1,44
	Warstwa 3 - 2 strona	276	27,6	1,42	1,44

Tabela 18. Zastosowane parametry spawania stali S235JR dla próbki w stanie po przekuwaniu międzyścigowym

Lp.	Nr ściegu	I_{sr} [A]	U_{sr} [V]	t_w [min]	Q [kJ/mm]
A2 S235M	Warstwa 1 - 1 strona	279	27,6	1,33	1,37
	Warstwa 1 - 2 strona + przekuwanie obu stron	277	27,6	1,42	1,44
	Warstwa 2 - 1 strona	276	27,6	1,42	1,44
	Warstwa 2 - 2 strona	276	27,6	1,42	1,44
	Warstwa 2 - 1 strona	281	27,6	1,48	1,53
	Warstwa 2 - 2 strona + przekuwanie obu stron	280	27,6	1,50	1,55
	Warstwa 3 - 1 strona	277	27,6	1,42	1,44
	Warstwa 3 - 2 strona	276	27,6	1,42	1,44
	Warstwa 3 - 1 strona	280	27,6	1,50	1,55
	Warstwa 3 - 2 strona	276	27,6	1,42	1,44
	Warstwa 3 - 1 strona	276	27,6	1,42	1,44
	Warstwa 3 - 2 strona + przekuwanie obu stron	281	27,6	1,48	1,53

Tabela 19. Zastosowane parametry spawania stali S235JR dla próbki w stanie po obróbce cieplnej

Lp.	Nr ściegu	I_{sr} [A]	U_{sr} [V]	t_w [min]	Q [kJ/mm]
A3 S235H	Warstwa 1 - 1 strona	279	27,6	1,37	1,40
	Warstwa 1 - 2 strona	277	27,6	1,42	1,44
	Warstwa 2 - 1 strona	276	27,6	1,42	1,44
	Warstwa 2 - 2 strona	276	27,6	1,52	1,54
	Warstwa 2 - 1 strona	276	27,6	1,42	1,44
	Warstwa 2 - 2 strona	276	27,6	1,42	1,44
	Warstwa 3 - 1 strona	276	27,6	1,42	1,44
	Warstwa 3 - 2 strona	281	27,6	1,48	1,53
	Warstwa 3 - 1 strona	276	27,6	1,42	1,44
	Warstwa 3 - 2 strona	276	27,6	1,42	1,44
	Warstwa 3 - 1 strona	280	27,6	1,50	1,55
	Warstwa 3 - 2 strona	276	27,6	1,42	1,44



Rys. 45. Zestawienie energii liniowej dla poszczególnych warstw wykonanych w ramach próbek z materiału S235JR

Tabele 17-19 oraz Rysunek 45, przedstawiają parametry spawania dla każdej z warstw wykonanych na płytach próbnych. Osiągnięte wyniki zakresu energii liniowej dla każdego z poszczególnych ściegów świadczą o tym, że spawanie w trybie częściowo zmechanizowanym przez tego samego uprawnionego spawacza pozwoliło na uzyskanie zbliżonych do siebie wartości energii liniowej.

Tabela 20. Zastosowane parametry spawania dla materiału S355J2+N bez obróbki

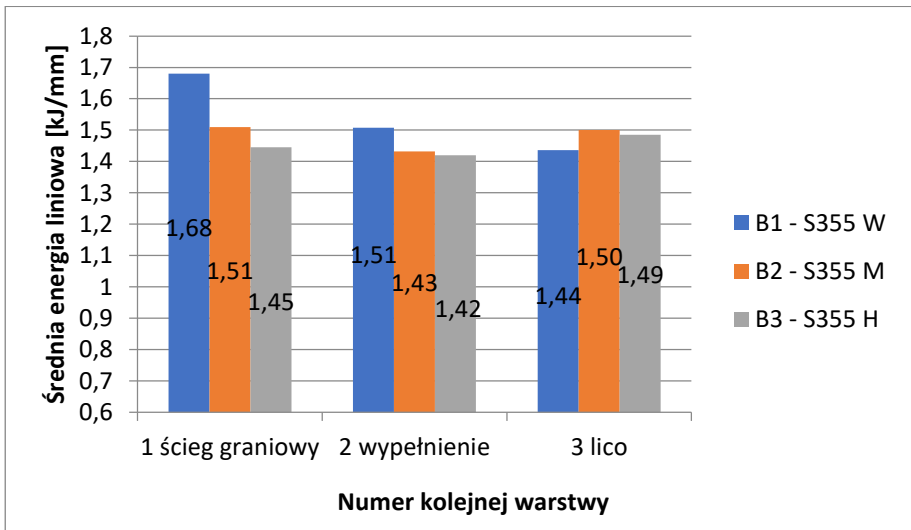
Lp.	Nr ściegu	I_{sr} [A]	U_{sr} [V]	t_w [min]	Q [kJ/mm]
B1 S355W	Warstwa 1 - 1 strona	276	27,3	1,68	1,69
	Warstwa 1 - 2 strona	280	27,6	1,62	1,67
	Warstwa 2 - 1 strona	277	27,6	1,62	1,65
	Warstwa 2 - 2 strona	291	27,6	1,30	1,39
	Warstwa 2 - 1 strona	277	27,6	1,48	1,51
	Warstwa 2 - 2 strona	284	27,6	1,42	1,48
	Warstwa 3 - 1 strona	290	27,6	1,38	1,48
	Warstwa 3 - 2 strona	282	27,6	1,28	1,33
	Warstwa 3 - 1 strona	294	27,3	1,32	1,41
	Warstwa 3 - 2 strona	277	27,6	1,48	1,51
	Warstwa 3 - 1 strona	290	27,6	1,38	1,48
	Warstwa 3 - 2 strona	294	27,3	1,32	1,41

Tabela 21. Zastosowane parametry spawania stali S355J2+N dla próbki w stanie po przekuwaniu międzyścigowym

Lp.	Nr ściegu	I_{sr} [A]	U_{sr} [V]	t_w [min]	Q [kJ/mm]
B2 S355M	Warstwa 1 - 1 strona	281	27,6	1,50	1,55
	Warstwa 1 - 2 strona + przekuwanie obu stron	278	27,6	1,43	1,47
	Warstwa 2 - 1 strona	288	27,6	1,28	1,36
	Warstwa 2 - 2 strona	276	27,6	1,52	1,54
	Warstwa 2 - 1 strona	280	27,6	1,32	1,36
	Warstwa 2 - 2 strona + przekuwanie obu stron	292	27,6	1,37	1,47
	Warstwa 3 - 1 strona	277	27,6	1,48	1,51
	Warstwa 3 - 2 strona	290	27,3	1,40	1,48
	Warstwa 3 - 1 strona	290	27,3	1,48	1,57
	Warstwa 3 - 2 strona	280	27,6	1,32	1,36
	Warstwa 3 - 1 strona	277	27,6	1,48	1,51
	Warstwa 3 - 2 strona + przekuwanie obu stron	290	27,3	1,48	1,57

Tabela 22. Zastosowane parametry spawania stali S355J2+N dla próbki w stanie po obróbce cieplnej

Lp.	Nr ściegu	I_{sr} [A]	U_{sr} [V]	t_w [min]	Q [kJ/mm]
B3 S355H	Warstwa 1 - 1 strona	279	27,6	1,57	1,61
	Warstwa 1 - 2 strona	286	27,6	1,22	1,28
	Warstwa 2 - 1 strona	288	27,6	1,28	1,36
	Warstwa 2 - 2 strona	276	27,6	1,52	1,54
	Warstwa 2 - 1 strona	279	27,6	1,28	1,32
	Warstwa 2 - 2 strona	281	27,6	1,42	1,46
	Warstwa 3 - 1 strona	277	27,6	1,48	1,51
	Warstwa 3 - 2 strona	290	27,6	1,43	1,53
	Warstwa 3 - 1 strona	294	27,3	1,42	1,52
	Warstwa 3 - 2 strona	279	27,6	1,28	1,32
	Warstwa 3 - 1 strona	277	27,6	1,48	1,51
	Warstwa 3 - 2 strona	294	27,3	1,42	1,52



Rys. 46. Zestawienie energii liniowej dla poszczególnych warstw wykonanych ze stali S355J2+N

Tabele 20-22 i rysunek 46 przedstawiają parametry spawania dla każdej z warstw wykonanych na płytach próbnych. Osiągnięte wyniki zakresu energii liniowej dla każdego z poszczególnych ściegów świadczą o tym, że spawanie w trybie częściowo zmechanizowanym przez tego samego uprawnionego spawacza pozwoliło na uzyskanie zbliżonych do siebie wartości energii liniowej, jedynie dla pierwszej warstwy można zauważyć różnicę wynoszącą około 15% natomiast jest to nadal różnica, którą potraktowano jako akceptowalną w kontekście spawania przez człowieka.

Tabela 23. Zastosowane parametry spawania stali S460NL dla próbki bez obróbki

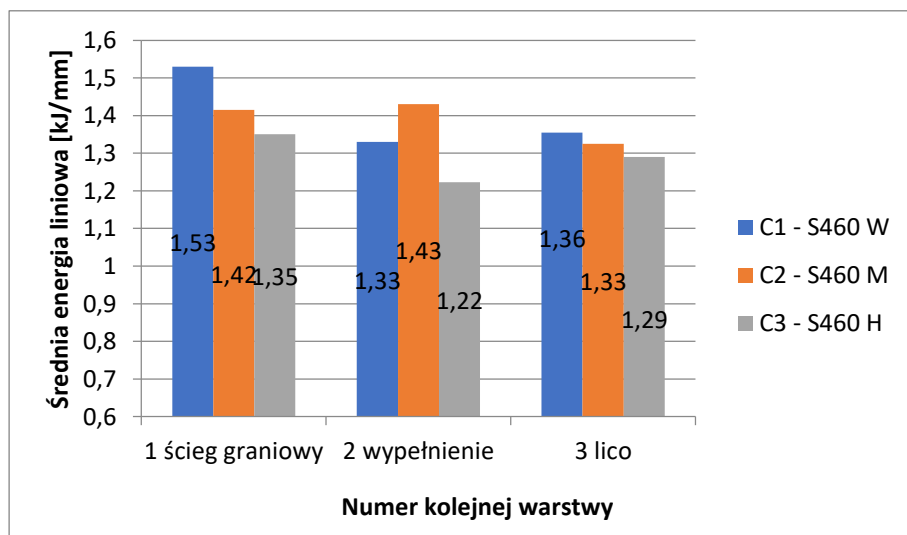
Lp.	Nr ściegu	I_{sr} [A]	U_{sr} [V]	t_w [min]	Q [kJ/mm]
C1 S460W	Warstwa 1 - 1 strona	269	28,2	1,58	1,60
	Warstwa 1 - 2 strona	277	28,2	1,40	1,46
	Warstwa 2 - 1 strona	276	28,2	1,32	1,37
	Warstwa 2 - 2 strona	280	28,2	1,27	1,33
	Warstwa 2 - 1 strona	251	28,5	1,30	1,24
	Warstwa 2 - 2 strona	266	28,2	1,38	1,38
	Warstwa 3 - 1 strona	282	28,2	1,37	1,45
	Warstwa 3 - 2 strona	283	28,2	1,35	1,44
	Warstwa 3 - 1 strona	262	28,2	1,25	1,23
	Warstwa 3 - 2 strona	250	28,5	1,33	1,27
	Warstwa 3 - 1 strona	266	28,2	1,50	1,50
	Warstwa 3 - 2 strona	251	28,5	1,30	1,24

Tabela 24. Zastosowane parametry spawania stali S460NL dla próbki w stanie po przekuwaniu międzyściegowym

Lp.	Nr ściegu	I_{sr} [A]	U_{sr} [V]	t_w [min]	Q [kJ/mm]
C2 S460M	Warstwa 1 - 1 strona	265	28,2	1,42	1,41
	Warstwa 1 - 2 strona + przekuwanie obu stron	269	28,2	1,40	1,42
	Warstwa 2 - 1 strona	277	28,2	1,40	1,46
	Warstwa 2 - 2 strona	282	28,2	1,37	1,45
	Warstwa 2 - 1 strona	276	28,2	1,32	1,37
	Warstwa 2 - 2 strona + przekuwanie obu stron	283	28,2	1,35	1,44
	Warstwa 3 - 1 strona	280	28,2	1,27	1,33
	Warstwa 3 - 2 strona	262	28,2	1,25	1,23
	Warstwa 3 - 1 strona	251	28,5	1,30	1,24
	Warstwa 3 - 2 strona	250	28,5	1,33	1,27
	Warstwa 3 - 1 strona	266	28,2	1,38	1,38
	Warstwa 3 - 2 strona + przekuwanie obu stron	266	28,2	1,50	1,50

Tabela 25. Zastosowane parametry spawania stali S460NL dla próbki w stanie po obróbce cieplnej

Lp.	Nr ściegu	I_{sr} [A]	U_{sr} [V]	t_w [min]	Q [kJ/mm]
C3 S460H	Warstwa 1 - 1 strona	255	27,6	1,28	1,20
	Warstwa 1 - 2 strona	266	28,2	1,50	1,50
	Warstwa 2 - 1 strona	258	27,6	1,47	1,39
	Warstwa 2 - 2 strona	253	27,6	1,20	1,12
	Warstwa 2 - 1 strona	259	27,0	1,32	1,23
	Warstwa 2 - 2 strona	264	27,9	1,17	1,15
	Warstwa 3 - 1 strona	263	28,2	1,18	1,17
	Warstwa 3 - 2 strona	270	28,2	1,30	1,32
	Warstwa 3 - 1 strona	281	28,2	1,35	1,43
	Warstwa 3 - 2 strona	274	28,2	1,25	1,29
	Warstwa 3 - 1 strona	270	28,2	1,27	1,29
	Warstwa 3 - 2 strona	268	28,2	1,23	1,24



Rys. 47. Zestawienie energii liniowej dla poszczególnych warstw wykonanych ze stali S460NL

Tabele 23-25 i rysunek 47 przedstawiają parametry spawania dla każdej z warstw wykonanych na płytach próbnych. Osiągnięte wyniki zakresu energii liniowej dla każdego z poszczególnych ściegów świadczą o tym, że spawanie w trybie częściowo zmechanizowanym przez tego samego uprawnionego spawacza pozwoliło na uzyskanie zbliżonych do siebie wartości energii liniowej.

Tabela 26. Zastosowane parametry spawania stali S690QL bez obróbki

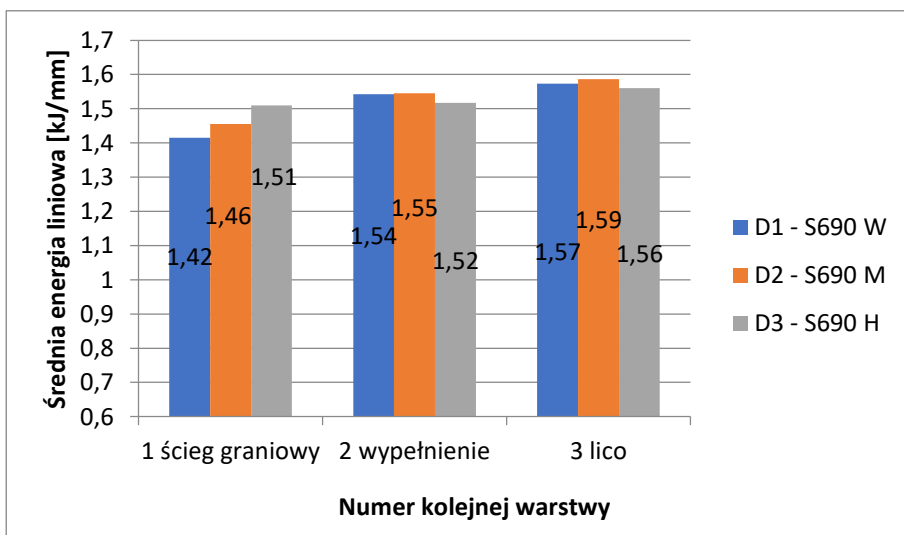
Lp.	Nr ściegu	I_{sr} [A]	U_{sr} [V]	t_w [min]	Q [kJ/mm]
D1 S690W	Warstwa 1 - 1 strona	279	27,6	1,33	1,37
	Warstwa 1 - 2 strona	282	27,7	1,40	1,46
	Warstwa 2 - 1 strona	276	27,6	1,50	1,52
	Warstwa 2 - 2 strona	280	27,8	1,43	1,49
	Warstwa 2 - 1 strona	281	27,6	1,50	1,55
	Warstwa 2 - 2 strona	278	27,7	1,57	1,61
	Warstwa 3 - 1 strona	279	27,6	1,67	1,71
	Warstwa 3 - 2 strona	286	27,8	1,45	1,54
	Warstwa 3 - 1 strona	288	27,7	1,38	1,47
	Warstwa 3 - 2 strona	276	27,6	1,52	1,54
	Warstwa 3 - 1 strona	277	27,8	1,58	1,63
	Warstwa 3 - 2 strona	280	27,6	1,50	1,55

Tabela 27. Zastosowane parametry spawania stali S690QL dla próbki w stanie po przekuwaniu międzyścigowym

Lp.	Nr ściegu	I_{sr} [A]	U_{sr} [V]	t_w [min]	Q [kJ/mm]
D2 S690M	Warstwa 1 - 1 strona	284	27,6	1,37	1,43
	Warstwa 1 - 2 strona + przekuwanie obu stron	280	27,7	1,43	1,48
	Warstwa 2 - 1 strona	279	27,6	1,53	1,57
	Warstwa 2 - 2 strona	284	27,6	1,40	1,46
	Warstwa 2 - 1 strona	280	27,8	1,47	1,52
	Warstwa 2 - 2 strona + przekuwanie obu stron	288	27,7	1,53	1,63
	Warstwa 3 - 1 strona	281	27,6	1,63	1,69
	Warstwa 3 - 2 strona	282	27,8	1,48	1,55
	Warstwa 3 - 1 strona	284	27,6	1,42	1,48
	Warstwa 3 - 2 strona	280	27,8	1,55	1,61
	Warstwa 3 - 1 strona	281	27,6	1,55	1,60
	Warstwa 3 - 2 strona + przekuwanie obu stron	282	27,6	1,53	1,59

Tabela 28. Zastosowane parametry spawania stali S690QL dla próbki w stanie po obróbce cieplnej

Lp.	Nr ściegu	I_{sr} [A]	U_{sr} [V]	t_w [min]	Q [kJ/mm]
D3 S690H	Warstwa 1 - 1 strona	284	27,6	1,43	1,50
	Warstwa 1 - 2 strona	280	27,8	1,47	1,52
	Warstwa 2 - 1 strona	288	27,7	1,50	1,60
	Warstwa 2 - 2 strona	281	27,6	1,40	1,45
	Warstwa 2 - 1 strona	276	28,2	1,32	1,37
	Warstwa 2 - 2 strona	280	27,7	1,60	1,65
	Warstwa 3 - 1 strona	279	27,6	1,48	1,52
	Warstwa 3 - 2 strona	286	27,7	1,42	1,50
	Warstwa 3 - 1 strona	282	27,6	1,50	1,56
	Warstwa 3 - 2 strona	284	27,8	1,55	1,63
	Warstwa 3 - 1 strona	280	27,6	1,55	1,60
	Warstwa 3 - 2 strona	281	27,8	1,48	1,55



Rys. 48. Zestawienie energii liniowej dla poszczególnych warstw wykonanych ze stali S690QL

Tabele 26-28 i rysunek 48 przedstawiają parametry spawania dla każdej z warstw wykonanych na płytach próbnych. Osiągnięte wyniki zakresu energii liniowej dla każdego z poszczególnych ściegów świadczą o tym, że spawanie w trybie częściowo zmechanizowanym przez tego samego uprawnionego spawacza pozwoliło na uzyskanie zbliżonych do siebie wartości energii liniowej.

Tabela 29. Zastosowane parametry spawania stali S960QL bez obróbki

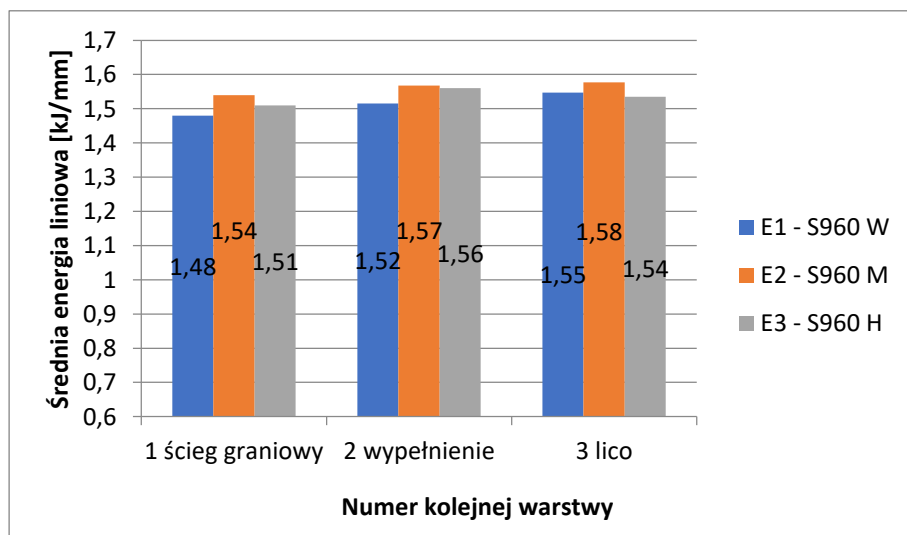
Lp.	Nr ściegu	I_{sr} [A]	U_{sr} [V]	t_w [min]	Q [kJ/mm]
E1 S960W	Warstwa 1 - 1 strona	284	27,6	1,43	1,50
	Warstwa 1 - 2 strona	282	27,7	1,40	1,46
	Warstwa 2 - 1 strona	276	27,6	1,50	1,52
	Warstwa 2 - 2 strona	280	27,8	1,43	1,49
	Warstwa 2 - 1 strona	281	27,6	1,50	1,55
	Warstwa 2 - 2 strona	286	27,7	1,42	1,50
	Warstwa 3 - 1 strona	279	27,6	1,48	1,52
	Warstwa 3 - 2 strona	282	27,6	1,50	1,56
	Warstwa 3 - 1 strona	282	27,8	1,48	1,55
	Warstwa 3 - 2 strona	276	27,6	1,52	1,54
	Warstwa 3 - 1 strona	282	27,6	1,50	1,56
	Warstwa 3 - 2 strona	280	27,6	1,50	1,55

Tabela 30. Zastosowane parametry spawania stali S960QL dla próbki w stanie po przekuwaniu międzyściegowym

Lp.	Nr ściegu	I_{sr} [A]	U_{sr} [V]	t_w [min]	Q [kJ/mm]
E2 S960M	Warstwa 1 - 1 strona	288	27,7	1,50	1,60
	Warstwa 1 - 2 strona + przekuwanie obu stron	280	27,7	1,43	1,48
	Warstwa 2 - 1 strona	279	27,6	1,53	1,57
	Warstwa 2 - 2 strona	284	27,6	1,40	1,46
	Warstwa 2 - 1 strona	280	27,8	1,55	1,61
	Warstwa 2 - 2 strona + przekuwanie obu stron	288	27,7	1,53	1,63
	Warstwa 3 - 1 strona	281	27,6	1,63	1,69
	Warstwa 3 - 2 strona	282	27,8	1,48	1,55
	Warstwa 3 - 1 strona	280	27,7	1,43	1,48
	Warstwa 3 - 2 strona	282	27,8	1,48	1,55
	Warstwa 3 - 1 strona	281	27,6	1,55	1,60
	Warstwa 3 - 2 strona + przekuwanie obu stron	282	27,6	1,53	1,59

Tabela 31. Zastosowane parametry spawania stali S960QL dla próbki w stanie po obróbce cieplnej

Lp.	Nr ściegu	I_{sr} [A]	U_{sr} [V]	t_w [min]	Q [kJ/mm]
E3 S960H	Warstwa 1 - 1 strona	284	27,6	1,43	1,50
	Warstwa 1 - 2 strona	280	27,8	1,47	1,52
	Warstwa 2 - 1 strona	288	27,7	1,50	1,60
	Warstwa 2 - 2 strona	281	27,6	1,40	1,45
	Warstwa 2 - 1 strona	284	27,8	1,47	1,54
	Warstwa 2 - 2 strona	280	27,7	1,60	1,65
	Warstwa 3 - 1 strona	279	27,6	1,48	1,52
	Warstwa 3 - 2 strona	286	27,7	1,42	1,50
	Warstwa 3 - 1 strona	282	27,6	1,50	1,56
	Warstwa 3 - 2 strona	282	27,8	1,48	1,55
	Warstwa 3 - 1 strona	282	27,6	1,50	1,56
	Warstwa 3 - 2 strona	279	27,6	1,48	1,52



Rys. 49. Zestawienie energii liniowej dla poszczególnych warstw wykonanych ze stali S960QL

Tabele 29-31 i rysunek 49, przedstawiają parametry spawania dla każdej z warstw wykonanych na płytach próbnych. Osiągnięte wyniki zakresu energii liniowej dla każdego z poszczególnych ściegów świadczą o tym, że spawanie w trybie częściowo zmechanizowanym przez tego samego uprawnionego spawacza pozwoliło na uzyskanie zbliżonych do siebie wartości energii liniowej.

Wszystkie złącza teowe z dwustronnymi spoinami pachwinowymi zostały poddane badaniom wizualnym oraz pomiarom wielkości spoin. Zestawienie wielkości spoin i ocenę poziomu jakości przedstawia Tabela 32.

Tabela 32. Wyniki pomiarów wielkości spoin pachwinowych w wybranych punktach z obu stron spoin i ocena zgodnie z normą

Lp.	Wielkość spoiny pachwinowej a [mm]				Czy spełnia kryteria ISO 5817-C?
	1	2	3	Średnia	
Pomiar					TAK/NIE
A1 S235W	12,3	12,3	12,6	12,4	TAK
A2 S235M	12,4	12,3	12,5	12,4	TAK
A3 S235H	12,1	12,0	12,5	12,2	TAK
B1 S355W	12,8	12,3	12,4	12,5	TAK
B2 S355M	12,2	12,2	12,2	12,2	TAK
B3 S355H	12,6	12,9	12,1	12,5	TAK
C1 S460W	12,9	12,0	12,1	12,3	TAK
C2 S460M	12,3	12,8	12,2	12,4	TAK
C3 S460H	12,3	12,3	12,3	12,3	TAK
D1 S690W	12,8	12,8	12,5	12,7	TAK
D2 S690M	12,8	13,0	12,1	12,6	TAK
D3 S690H	12,5	12,9	12,1	12,5	TAK

E1 S960W	12,8	12,5	12,3	12,5	TAK
E2 S960M	12,7	12,7	12,2	12,5	TAK
E3 S960H	12,5	12,1	12,2	12,3	TAK

Wyniki przedstawione w Tabeli 32, świadczą o wysokiej powtarzalności w zakresie spawania wykonanego przez tego samego uprawnionego spawacza dla wszystkich płyt próbnych. Poza energią liniową, rozmiar wykonanych spoin pachwinowych również odgrywał bardzo istotną rolę w kontekście odkształceń. Dla zestawionych wyników uznano, że wymiar spoin nie miał wpływu na różnice w odkształceniach ze względu na bardzo małe różnice pomiędzy zmierzonymi wartościami.

3.7.1. Przekuwanie międzysięgowe w trakcie i po spawaniu

Przekuwanie o wysokiej częstotliwości (90 Hz) każdego wykonanego ściegu miało na celu zmniejszenie naprężeń w złączu spawanym poprzez wprowadzenie do niego naprężeń ściskających. Został do tego wykorzystany młot pneumatyczny Weld Line 10 firmy PITEC GmbH. Aby urządzenie działało skutecznie należy zapewnić ciśnienie w układzie sprężonego powietrza pomiędzy 4 a 7 bar. W trakcie wykonywania przekuwania ciśnienie wynosiło około 6,0 bar. Poprawność przekuwania osiągnięto wówczas gdy 100% powierzchni każdego ściegu wraz z licem zostało poddane obróbce, a sama obróbka prowadzona była ręcznie (Rys. 50-52). Przekuwanie było podzielone na dwa etapy, pierwszym z nich było przekucie w obszarze strefy wpływu ciepła (linie wtopienia spoiny pachwinowej) z wykorzystaniem trzpienia o promieniu wierzchołka $R=1,5\text{mm}$, a następnie przekucie pozostałej powierzchni lica spoiny z

wymienionym trzpieniem o średnicy $R=2,0\text{mm}$. Prędkość przekuwania wynosiła w zależności od materiału podstawowego i dodatkowego do spawania od około 30 cm/min (złącza A, B oraz C) do 20 cm/min (złącza D i E).



Rys. 50. Lico spoiny pachwinowej płyty o oznaczeniu B2 po zakończeniu spawania drugiej warstwy



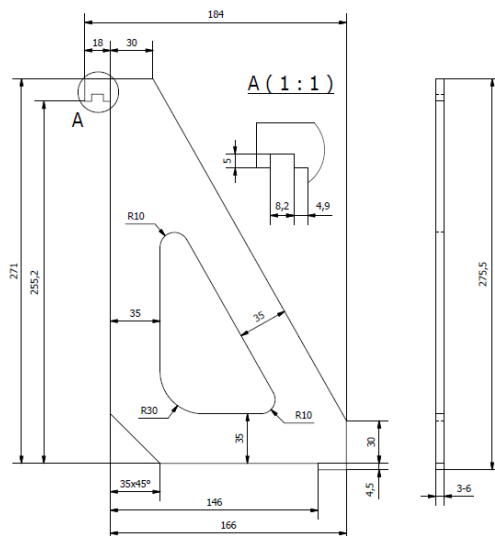
Rys. 51. Lico spoiny pachwinowej płyty o oznaczeniu B2 po zakończeniu spawania drugiej warstwy po wykonaniu pierwszego etapu przekuwania



Rys. 52. Lico spoiny pachwinowej płyty o oznaczeniu B2 po zakończeniu spawania drugiej warstwy po zakończeniu przekuwania

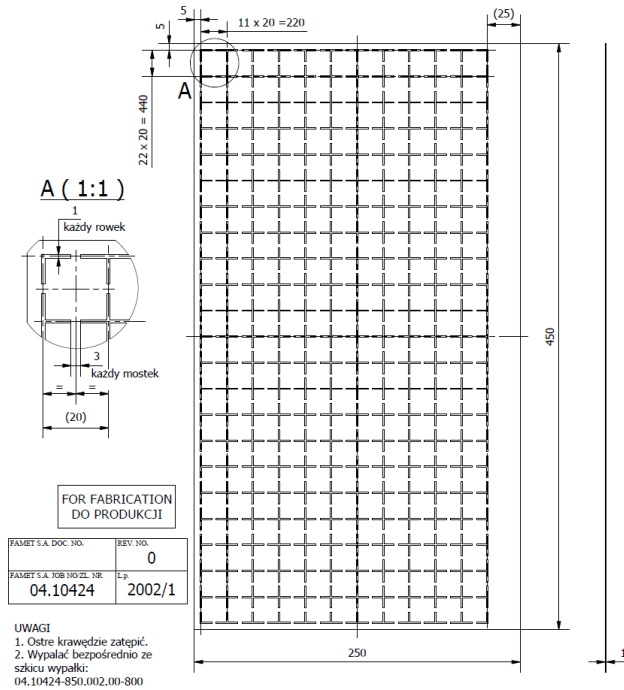
3.7.2. Pomiar z wykorzystaniem laser trackera

Przed spawaniem konieczne było wykonanie pomiarów z wykorzystaniem laser trackera aby w tych samych punktach pomiarowych zmierzyć stan deformacji po spawaniu. Laser tracker API Radian PLUS R50 wykorzystany do pomiarów posiadał dokładność pomiaru wynoszącą $0,7\mu\text{m}/\text{m}$. Celem weryfikacji odkształceń, przed spawaniem każdej z płyt naniesiono na nich siatkę równo rozłożonych punktów pomiarowych. Aby było to możliwe przed spawaniem każdy zestaw płyt został zmontowany przy pomocy szablonu, (Rys. 53).



Rys. 53. Szablon do ustawiania blach przed spawaniem

Siatka punktów pomiarowych została wytrasowana przy pomocy szablonu, (Rys. 54). Widok przygotowanego złącza przedstawia Rys, 55.



Rys. 54. Szablon do trasowania punktów pomiarowych na blachach do spawania

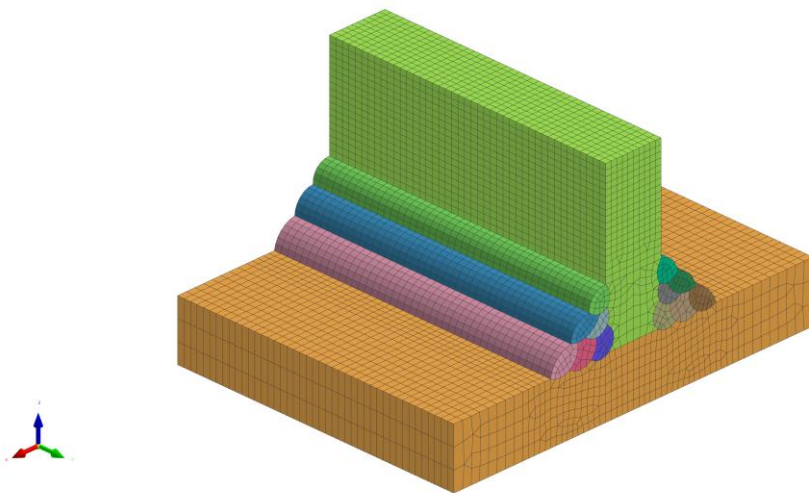


Rys. 55. Złącze teowe przygotowane do spawania z wytrasowaną siatką punktów do pomiaru przed i po spawaniu i procesach towarzyszących

Po zakończeniu spawania i procesów towarzyszących (takich jak HFMI czy PWHT) wykonano pomiar stopnia odkształcenia poprzez wyznaczenie różnic w płaskości blachy stanowiącej podstawę złącza teowego przed i po spawaniu oraz jako drugi parametr przyjęto wyznaczenie różnic w prostoliniowości każdej z blach poprzez porównanie punktów A0-W0, A15-W15, A32-W32 oraz A33-W33 dla każdej z płyt przed i po spawaniu. Punkty te znajdowały się w wyfrezowanych rowkach na krawędziach zewnętrznych blach tworzących złącza teowe. W sumie na każdej poziomej płycie było 345 punktów pomiarowych, na pionowej 276 oraz po 23 punkty pomiarowe na każdym z 4 zafrezowań na końcach blach. O precyzji pomiarów świadczyć może łączna suma 713 pomiarów dla każdego złącza teowego.

3.7.3. Modelowanie procesów spawania i procesów towarzyszących z wykorzystaniem MES

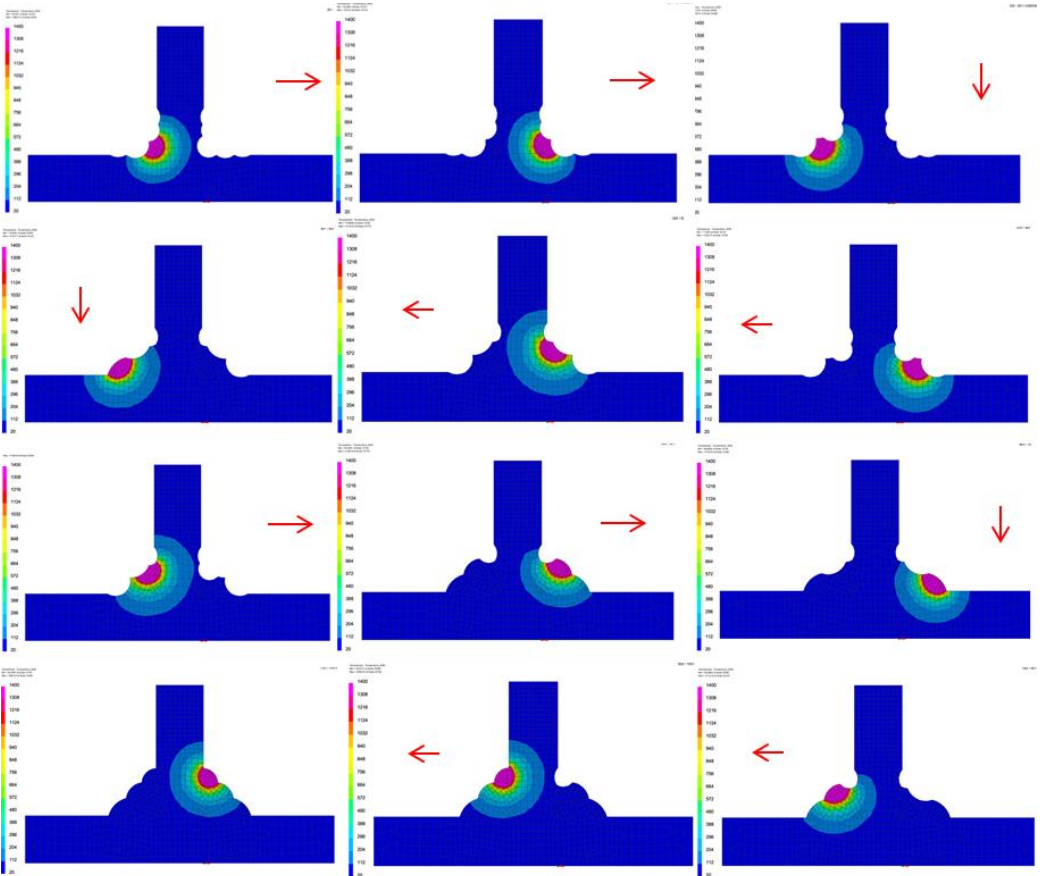
Aby zweryfikować i porównać wyniki pomiarów wykonanych laser trackerem, dla wybranych próbek przeprowadzono analizę z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Proces spawania został zamodelowany dla złączy teowych, a sam model składał się z 37576 węzłów i 44432 elementów, (Rys. 56).



Rys. 56. Model reprezentujący złącze teowe ze spoiną pachwinową odzwierciedlający rzeczywiste złącze spawane

Sekwencja spawania wraz z parametrami była odwzorowaniem

kolejności rzeczywistego spawania zarejestrowanych parametrów spawania w trakcie realizacji prac spawalniczych, (Rys. 57).



Rys. 57. Kolejność spawania poszczególnych ściegów w MES

Proces przekuwania o wysokiej częstotliwości został zamodelowany jako odkształcenie, a właściwie sukcesywne zmiany w przekroju równoległe do uderzenia urządzenia do przekuwania w rzeczywistości pod kątem 75° , a ponadto zadane przemieszczenie trzpienia przekuwającego w kierunku tożsamym

do kierunku spawania wyniosło 5mm/s odpowiadającym rzeczywistej prędkości procesu. W literaturze występuje podobne podejście do modelowania [52, 53, 63, 74, 75, 77, 79] tego procesu natomiast najczęściej spotyka się podejście gdzie sam proces spawania modelowany jest w oprogramowaniu typu Sysweld natomiast otrzymany model z określonym stanem naprężeń i odkształceń jest dalej analizowany pod kątem przekuwania, a właściwie odkształcenia plastycznego w oprogramowaniu typu Abaqus [3, 45, 46, 88, 89, 97, 98].

4. Metodyka badań

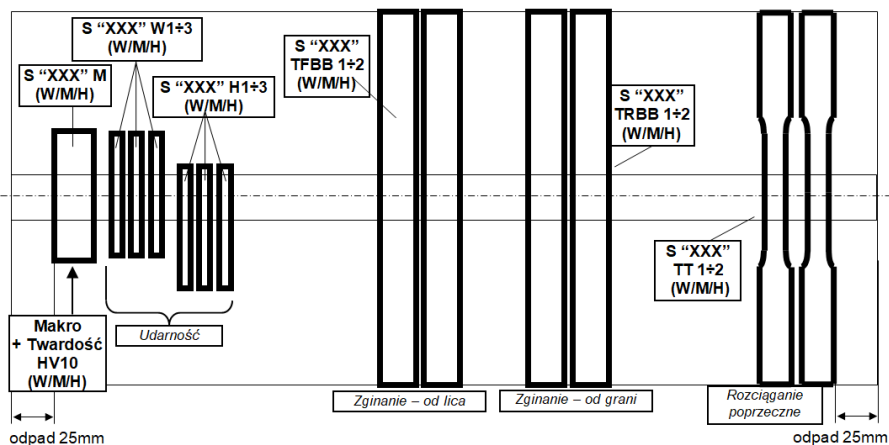
4.1. Badania zgodnie z wymogami normy PN-EN ISO 15614-1:2017

Zgodnie z wymaganiami specyfikacji i kwalifikowania technologii spawania metali – Badanie technologii spawania – Część 1, każda z płyt próbnych została poddana badaniom nieniszczącym:

- badanie wizualne (VT) zgodnie z PN-EN ISO 17637,
- badanie penetracyjne (PT) zgodnie z PN-EN ISO 3452-1,
- badanie radiograficzne (UT) zgodnie z PN-EN ISO 17640.

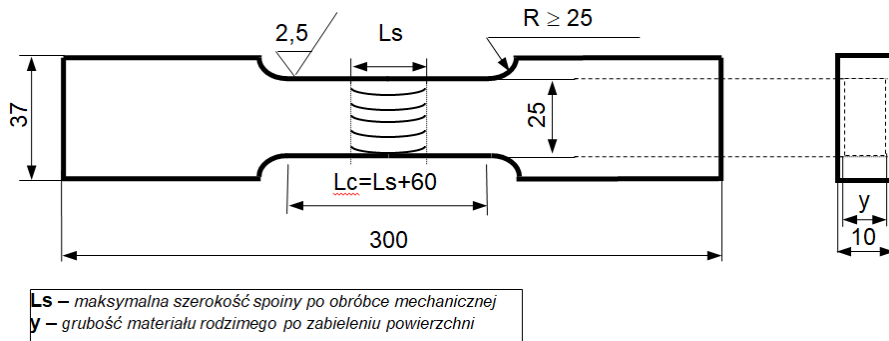
Wszystkie badania nieniszczące na płytach próbnych zakończyły się wynikiem pozytywnym.

Następnym krokiem było wykonanie próbek do badań niszczących zgodnie z PN-EN ISO 15614-1:2017, (Rys. 58):



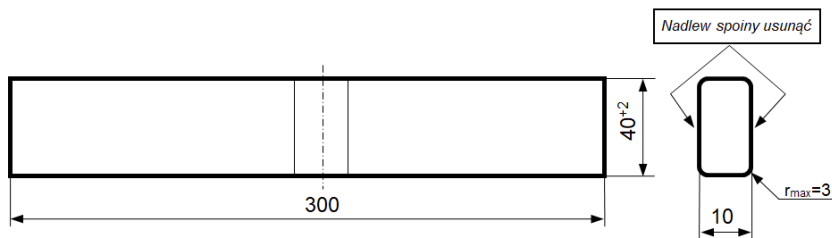
Rys. 58. Ilość i rodzaj próbek do badań niszczących z każdej z pospawanych próbek

- badanie na rozciąganie poprzeczne – 2 sztuki próbek z każdej pospawanej płyty zgodnie z PN-EN ISO 4136 o oznaczeniach S „*Granica plastyczności stali*” TT 1÷2, (Rys. 59);



Rys. 59. Sposób przygotowania próbek do rozciągania poprzecznego

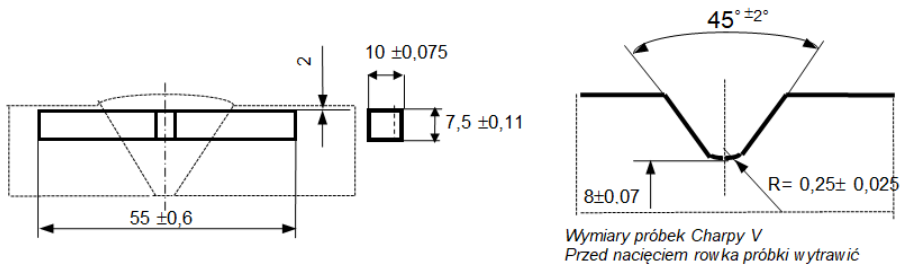
- badanie na zginanie poprzeczne – 4 sztuki próbek z każdej pospawanej płyty zgodnie z PN-EN ISO 5173, 2 na zginanie poprzeczne z rozciąganiem lica o oznaczeniach S „Granica plastyczności stali” TFBB 1÷2 oraz 2 na zginanie poprzeczne z rozciąganiem grani o oznaczeniach S „Granica plastyczności stali” TRBB 1÷2, Do badania na zginanie poprzeczne wykonane zostały dwie sztuki próbek do gięcia z rozciąganiem lica o szerokości 40 mm oraz dwie próbki do gięcia z rozciąganiem grani o szerokości 40 mm, Rys.60.



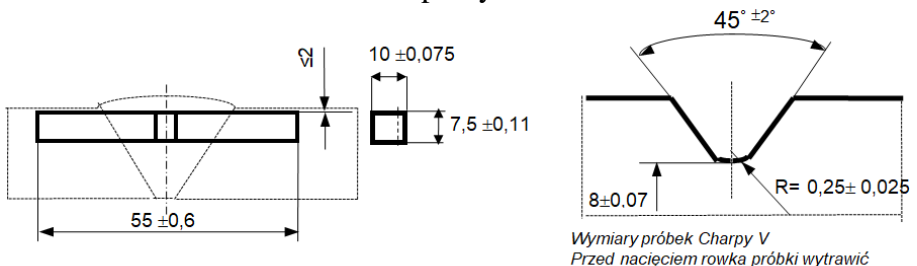
Rys. 60. Sposób przygotowania próbek do gięcia

- badanie udarności – 2 zestawy próbek z każdej pospawanej płyty zgodnie z PN-EN ISO 9016, zestaw 3 sztuk o

oznaczeniach S „*Granica plastyczności stali*” W 1÷3 dla próbek pobranych z osi spoiny i zestaw 3 o oznaczeniach S „*Granica plastyczności stali*” H 1÷3 dla próbek pobranych ze strefy wpływu ciepła. Ze względu na grubość materiału podstawowego, próbki do badania udarności wykonane zostały na wymiar 7,5 x 10 x 55 mm grubości (tzw. próbki o pomniejszonym przekroju), Rys. 61 i 62.

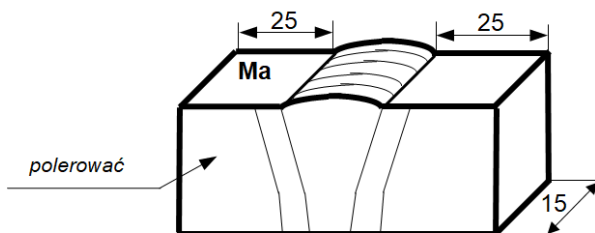


Rys. 61. Sposób przygotowania próbek do badania udarności z obszaru spoiny



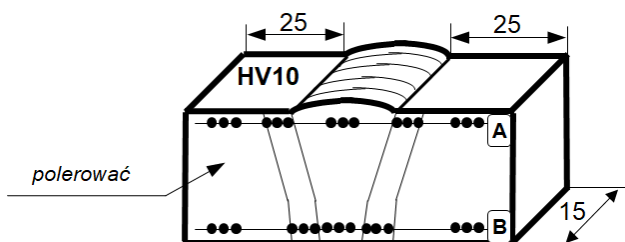
Rys. 62. Sposób przygotowania próbek do badania udarności z obszaru strefy wpływu ciepła

- badanie makroskopowe – 1 sztuka z każdej pospawanej płyty zgodnie z PN-EN ISO 17639 o oznaczeniach S „*Granica plastyczności stali*” M, Rys. 63.



Rys. 63. Sposób przygotowania próbek do badania makroskopowego

- badanie twardości – 1 sztuka z 2 liniami pomiaru z każdej pospawanej płyty zgodnie z PN-EN ISO 9015-1 o oznaczeniach S „Granica plastyczności stali” M, Rys. 64.



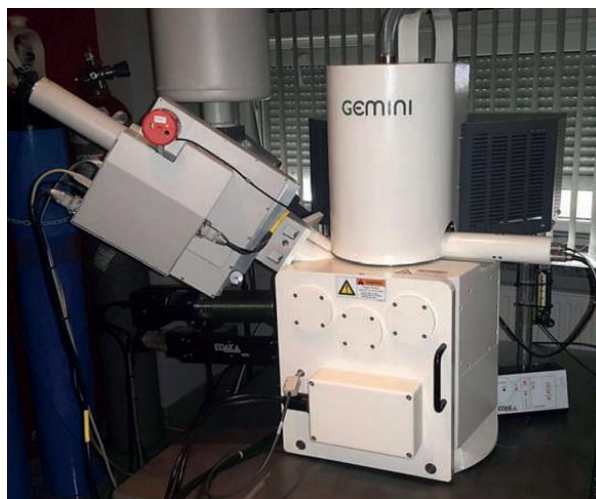
Rys. 64. Sposób przygotowania próbek do pomiaru twardości metodą Vickersa - HV 10

4.2. Badania na mikroskopie świetlnym

Obserwacje przekroju złączy spawanych przeprowadzono na mikroskopie odwróconym Eclipse MA 100. Ocena złączy spawanych w skali makro wykonano przy powiększeniu x8, natomiast obserwację mikrostruktury materiału rodzimego, SWC oraz spoiny przeprowadzono przy powiększeniu x200.

4.3. Analiza mikrostruktury z wykorzystaniem dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych EBSD

Badania strukturalne, w tym analizę fazową i orientację krystalograficzną ziarn wykonano metodą dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych z wykorzystaniem wysokorozdzielczego elektronowego mikroskopu skaningowego Supra 35 firmy Zeiss (Rys. 65) i kamery EBSD (Electron BackScatter Diffraction) oraz oprogramowania OIM Analysis firmy EDAX. Badania EBSD przeprowadzono na zglądach metalograficznych z krokiem $0,3\ \mu\text{m}$ przy powiększeniu 2000x wykonując analizy w dwóch obszarach: w obszarze materiału rodzimego oraz w strefie wpływu ciepła zarówno dla próbki w stanie po spawaniu jak i w stanie po przekuwaniu z wysoką częstotliwością. Napięcie przyspieszające wynosiło 20 kV, a odległość robocza 17 mm [38, 43, 44].



Rys. 65. Skaningowy mikroskop elektronowy Supra 35 firmy Zeiss z detektorami EDS oraz WDS firmy EDAX [35]

4.4. Pomiar naprężeń z wykorzystaniem efektu Barkhausena

Pomiar naprężeń wykonano dla wszystkich 15 doczołowych złączy spawanych w oparciu o procedurę badawczą dostawcy urządzenia MagStress5c do pomiaru naprężeń, Rys. 66 – Firmy NNT [15n].



Rys. 66. Urządzenie MagStress5c w trakcie pomiaru naprężeń w złączu spawanym

Badano pięć serii złożonych z trzech próbek, które były wycinkami z doczołowego złącza spawanego wykonanego z blachy o grubości $H = 10$ mm z pięciu gatunków stali. Próbkę w danej serii różniły się sposobem obróbki mającej na celu obniżenie poziomu naprężenia w obszarze złącza doczołowego. Stosowano w tym celu

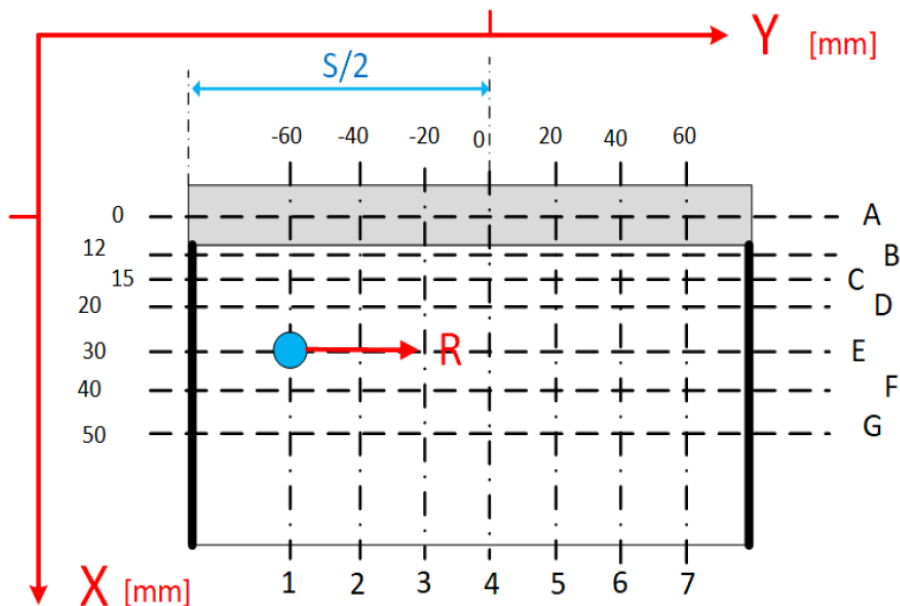
procedurę wyżarzania odprężającego oraz międzyściegową procedurę mechanicznego przekuwania o wysokiej częstotliwości (HFMI). Stan złącz ze względu na zastosowaną obróbkę kodowany jest za pomocą liter: W – stan po spawaniu, H – stan po wygrzewaniu, M – stan po odprężaniu mechanicznym. W Tabeli 33 zapisano informacje o gatunku stali, numery próbek w danej serii.

Tabela 33. Podział i oznaczenie próbek

Nr próbki	Oznaczenie próbki	Stan próbki	Kod próbki
1	S235W	Po spawaniu	21
2	S235M	Po spawaniu + HFMI	22
3	S235H	Po spawaniu + PWHT	23
4	S355W	Po spawaniu	31
5	S355M	Po spawaniu + HFMI	32
6	S355H	Po spawaniu + PWHT	33
7	S460W	Po spawaniu	41
8	S460M	Po spawaniu + HFMI	42
9	S460H	Po spawaniu + PWHT	43
10	S690W	Po spawaniu	61
11	S690M	Po spawaniu + HFMI	62
12	S690H	Po spawaniu + PWHT	63
13	S960W	Po spawaniu	91
14	S960M	Po spawaniu + HFMI	92
15	S960H	Po spawaniu + PWHT	93

4.4.1. Zastosowana metodyka badania stanu naprężenia

Stan naprężenia wyznaczano wykorzystując miernik MagStress5c i opracowaną procedurę badania PB01, która opisuje sposób wyznaczania stanu z wykorzystaniem efektu Barkhausena. Miernik ten mierzy natężenie efektu Barkhausena za pomocą standardowej sondy (z jednym rdzeniem) [95]. Kierunek magnesowania wyznacza tym samym kierunek badania natężenia EB. Rejestrowany sygnał napięciowy EB jest przeliczany w mierniku na deskryptor natężenia EB jakim jest parametr INT, który jest miarą napięcia skutecznego sygnału napięciowego EB [92, 93]. Pomiary natężenia EB – wielkość INT wyznaczano po stronie lica w kierunku równoległym do osi spoiny (kierunek R) dla szeregu punktów pomiarowych. Punkty są położone w węzłach sieci utworzonych z siedmiu linii pionowych i siedmiu poziomych. Położenie tych punktów na powierzchni płyty pokazano schematycznie na Rys. 67. Pierwsza linia pozioma (oznaczona jako A) leży wzdłuż nadlewu spoiny. Linie pionowe są numerowane od 1 do 7, poczynając od lewej krawędzi spoiny.



Rys. 67. Położenie punktów pomiarowych i kierunek badania sygnału EB, współrzędne linii zmieniają się w sposób zapisany w Tabeli 34

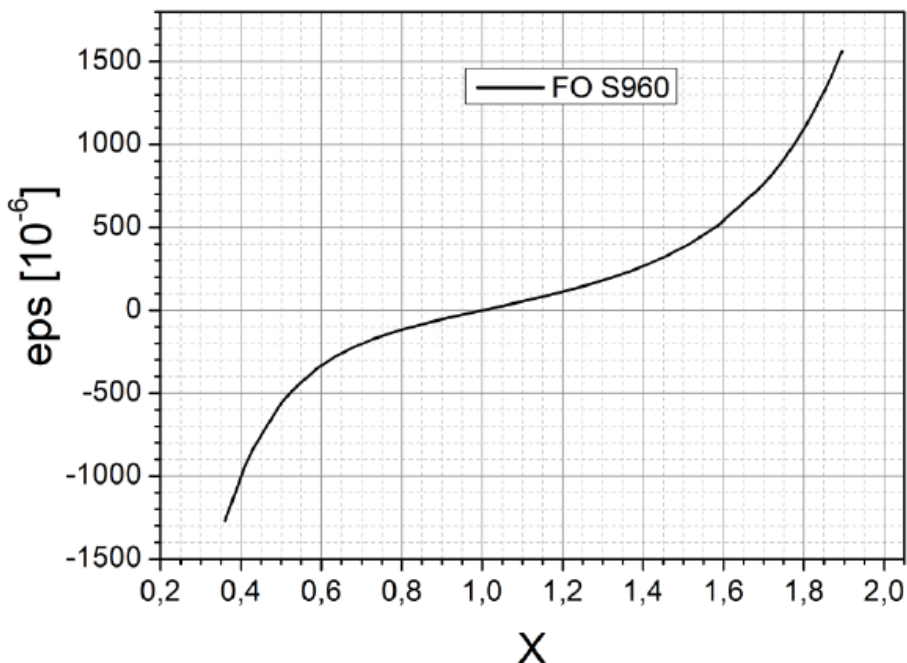
Tabela 34. Współrzędne linii pomiarowych

Lp	Linie	X [mm]	Linie	Y [mm]
1	A	0	1	-60
2	B	12	2	-40
3	C	15	3	-20
4	D	20	4	0
5	E	30	5	20
6	F	40	6	40
7	G	50	7	60

4.4.2. Metodyka wyznaczania poziomu naprężenia

System MagStress przelicza automatycznie wartość INT na odkształcenie ϵ_{ps} zgodnie z zapisaną w jego pamięci tabelą funkcji kalibracji typu $\epsilon_{ps} = FO(X)$, gdzie X jest ilorazem zmierzonego natężenia INT oraz wartości natężenia INT_{ref} , którą to wartość

przyjmuje się za reprezentatywną dla stanu nieodkształconego ($\epsilon = 0$). Miernik rejestruje wartość INT oraz wartość σ , czyli naprężenia – σ , która jest wyliczana z reguły $\sigma = E * \epsilon$, gdzie E to moduł Younga. W mierniku zapisana jest stała wartość $E = 210$ GPa. Do pomiarów zastosowano metodę analitycznego wyliczania wartości odkształcenia ϵ z zarejestrowanych miernikiem wartości INT. Dla wyznaczenia odkształcenia ϵ użyto funkcji kalibracyjnej FO wyznaczonej doświadczalnie dla próbek ze stali S235JR, S355J2+N, S460NL, S690QL oraz S960QL o wymiarach: długość $L = 200$ mm, szerokość $S = 30$ mm oraz grubość $h = 10$ mm. Procedura kalibracji polegała na wyznaczeniu zależności natężenia EB – wielkość INT, od zadanego na powierzchni próbki odkształcenia ϵ w kierunku równoległym do osi głównej próbek (kierunku spawania). Próbka była wyginana w urządzeniu z czteropunktowym systemem działania sił, a odkształcenie ϵ (mierzone rozetą tensometryczną) zmieniane było w zakresie sprężystym od $-700 \mu\text{def}$ do $+700 \mu\text{def}$ dla stali S235JR, S355J2+N oraz S460NL, a także od $-800 \mu\text{def}$ do $+800 \mu\text{def}$ dla próbki ze stali S690QL i S960QL. Uzyskane zależności zostały wykorzystane do opracowania funkcji odwrotnych FO typu $\epsilon = \text{FO}(X)$. Te funkcje mają zbliżony do siebie przebiegi i do dalszych obliczeń przyjęto funkcję FO(X) bazującą na wynikach kalibracji stali S960. Wykres funkcji FO(X) przedstawiono na Rys. 68. Jak widać, funkcja ta cechuje się charakterystycznym dla ferromagnetyków efektem nasycenia zmian natężenia EB dla dużych poziomów odkształcenia [94].



Rys. 68. Funkcja kalibracyjna FO(X) wykorzystana dla wyliczenia odkształcenia

Funkcja analityczna FO(X) została zapisana w postaci zależności typu:

$$eps = A \cdot \exp(B \cdot (X-1)) - C \cdot \exp(-D \cdot (X-1)) + E \cdot (X-1),$$

a wartości pięciu stałych wyznaczono z użyciem programu Origin. Wartość natężenia referencyjnego INTref potrzebnego do wyliczenia zmiennej X została ustalona poprzez analizę zmian granicznych wielkości *eps* wyliczonych z tej funkcji dla poszczególnych serii wyników INT zarejestrowanych dla każdego gatunku stali. Przyjęto do obliczeń dwie wartości referencyjne: INTref = 3500 dla gatunku S690QL oraz S960QL i INTref = 4000 dla pozostałych gatunków. Wartość *eps* przeliczana jest formalnie na

poziom naprężenia σ zgodnie z formułą $\sigma = E * \epsilon$, gdzie $E = 210$ GPa.

4.5. Jakościowa analiza fazowa oraz pomiary naprężeń z wykorzystaniem dyfrakcji rentgenowskiej

Badanie rentgenowskie analizowanych materiałów przeprowadzono na aparacie X'Pert PRO firmy Panalytical (Rys. 69) stosując filtrowanie promieniowanie lampy o anodzie kobaltowej ($\lambda = 1,79021$ Å). Rentgenowską jakościową analizę fazową badanych materiałów przeprowadzono w układzie Bragg-Brentano z wykorzystaniem detektora paskowego Xcelerator. Opierając się na założeniu, że natężenie promieniowania ugiętego na płaszczyznach krystalograficznych składników fazowych alfa i gamma jest proporcjonalne do udziału tych faz w badanych materiałach oszacowano udział objętościowy austenitu sposobem zaproponowanym przez Averbacha i Cohena. Metoda bezpośredniego porównania opierająca się na powyższym założeniu, wymaga pomiaru natężenia całkowitego dwóch lub większej liczby maksimumów dyfrakcyjnych fazy alfa i gamma, przy czym faza alfa stanowi wzorzec dla austenitu. W pracy przyjęto, że skład chemiczny fazy alfa jest taki sam jak fazy gamma [39, 40, 41].



Rys. 69. Dyfraktogram rentgenowski X'Pert PRO firmy Panalytical

Pomiar naprężeń metodą XRD analizowanych materiałów wykonano techniką $\sin^2\psi$ opierając się na firmowym programie X'Pert Stress Plus, który zawiera w formie bazy danych niezbędne do obliczeń wartości stałych materiałowych. W metodzie $\sin^2\psi$ opartej na efekcie przesunięcia linii dyfrakcyjnych dla różnych kątów ψ występujących w warunkach naprężenia materiałów o strukturze krystalicznej wykorzystano krzemowy detektor paskowy po stronie wiązki ugiętej. Kąty nachylenia próbek ψ względem wiązki pierwotnej zmieniano w zakresie $0^\circ\div 75^\circ$. Analizę wykonano w kierunku równoległym względem kierunku napawania na podstawie analizy refleksu Fe (211). Położenia zarejestrowanych refleksów wyznaczone były metodą dopasowania krzywych Gaussa. [36, 37, 42, 85, 87].

5. Wyniki badań

W tym rozdziale opisano wyniki badań dotyczące zastosowanej technologii spawania i procesów towarzyszących jakim była pospawalnicza obróbka cieplna – wyżarzanie odprężające i przekuwanie o wysokiej częstotliwości.

5.1. Własności mechaniczne badanych złączy

W celu określenia wpływu poszczególnych procesów na własności mechaniczne przeprowadzono rozciąganie poprzeczne, zginanie poprzeczne, badanie udarności, pomiar twardości. Kryteria akceptacji przyjęte do oceny wyników pochodzą z normy PN-EN ISO15614-1:2017-08 [6n].

Próby statycznego rozciągania

Aby określić własności mechaniczne złączy poddanych różnym wariantom procesu spawania i procesów towarzyszących przeprowadzono statyczną próbę rozciągania zgodnie z normą PN-EN ISO 4136:2013-05 [10n] na hydraulicznej maszynie ZD-40 stosując zakres siły rozciągającej 400kN będącej na wyposażeniu FAMET S.A. Z każdego złącza próbnego pobrano dwie próbki, a same badania odbyły się w temperaturze $23\pm 5^{\circ}\text{C}$. Prędkość przemieszczania trawersy maszyny wytrzymałościowej wyrażona w postaci szybkości przyrostu naprężenia zawierała się w przedziale 8-12 MPa s⁻¹. Z krzywych uzyskanych w rezultacie próby wyznaczono wytrzymałość na rozciąganie R_m , (Tabela 35).

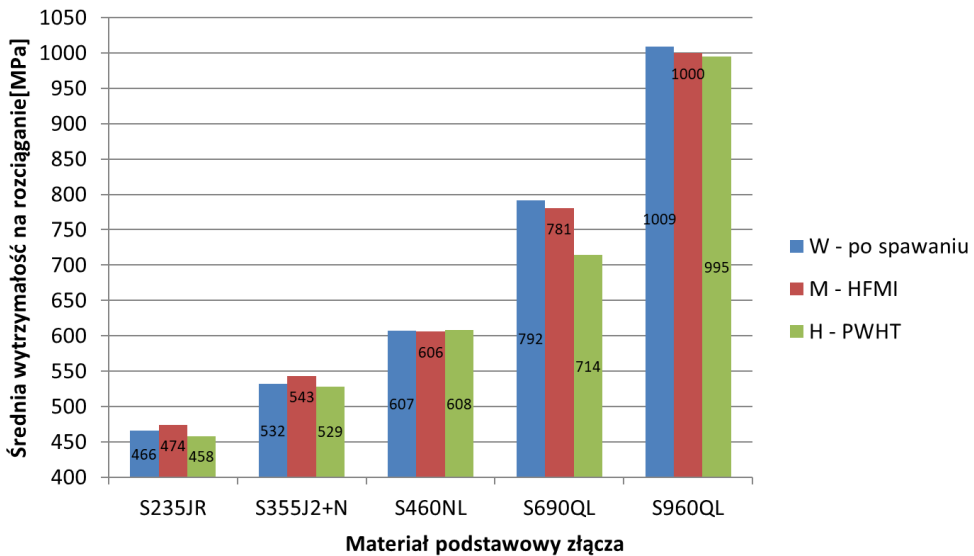
Zestawienie wyników dla poszczególnych grup materiałów przedstawione zostały na Rys 70. Przekuwanie międzyścigowe nie wpłynęło negatywnie na wyniki statycznej próby rozciągania, a średnie wartości wyników osiągniętych dla stali S235JR oraz S355J2+N są wyższe niż w przypadku próbek w stanie po spawaniu czy PWHT. Dla stali S460NL, S690QL oraz S960QL, wyniki R_m próbek po HFMI, także spełniają wymagania stawiane przez normę na kwalifikację technologii spawania. Należy zwrócić uwagę na wyniki R_m dla próbek po PWHT stali S690QL gdzie obróbka cieplna spowodowała spadek wytrzymałości na rozciąganie poniżej pułapu określonego w normie dla materiału rodzimego, a w przypadku stali S960QL średnie wartości uzyskane podczas próby są niższe niż w przypadku pozostałych próbek.

Tabela 35. Zestawienie wyników statycznej próby rozciągania.

Statyczna próba rozciągania - R_m [MPa]				
Próbka	TT-1	Uwagi	TT-2	Uwagi
S235W	464	Mat ¹	467	Mat*
S235M	479	Mat*	468	Mat*
S235H	454	Mat*	461	Mat*
S355W	525	Mat*	539	Mat*
S355M	542	Mat*	544	Mat*
S355H	529	Mat*	528	Mat*
S460W	608	Mat*	606	Mat*
S460M	608	Mat*	604	Mat*
S460H	606	Mat*	610	Mat*
S690W	793	SWC*	791	SWC*
S690M	782	SWC*	780	SWC*
S690H	714 ²	SWC*	714 ²	SWC*

S960W	1007	SWC*	1011	SWC*
S960M	1011	SWC*	989	SWC*
S960H	998	SWC*	992	SWC*

¹ Mat – zerwanie w materiale rodzimym; SWC – zerwanie w strefie wpływu ciepła
² Wynik próby negatywny



Rys. 70. Zestawienie porównawcze średnich wartości R_m dla poszczególnych połączeń spawanych

Próby zginania

Aby określić własności plastyczne złączy, przeprowadzono próbę gięcia zgodnie z PN-EN ISO 5173:2010 [11n]. Próbki do gięcia zostały przygotowane poprzez usunięcie lica i grani spoin na drodze szlifowania. Wszystkie próby zakończyły się wynikiem pozytywnym, co przedstawiono w Tabeli 36.

Tabela 36. Zestawienie wyników prób gięcia połączeń spawanych

Próba zginania						
Próbka	Typ próbki ¹	Kąt gięcia [°]	Ø trzpienia gnącego [mm]	Uwagi ²		
S235W	TRBB1	180	40	---		
	TRBB2			---		
	TFBB1			---		
	TFBB2			---		
S235M	TRBB1			---		
	TRBB2			---		
	TFBB1			---		
	TFBB2			---		
S235H	TRBB1			---		
	TRBB2			---		
	TFBB1			---		
	TFBB2			---		
S355W	TRBB1			180	40	2,5 mm
	TRBB2					---
	TFBB1					---
	TFBB2					---
S355M	TRBB1	---				
	TRBB2	---				
	TFBB1	---				
	TFBB2	---				
S355H	TRBB1	---				
	TRBB2	---				
	TFBB1	---				
	TFBB2	---				
S460W	TRBB1	180	48			---
	TRBB2					---
	TFBB1					---
	TFBB2					---
S460M	TRBB1			---		
	TRBB2			1,0 mm		
	TFBB1			1,0 mm		
	TFBB2			1,5 mm		
S460H	TRBB1			---		

	TRBB2			---		
	TFBB1			---		
	TFBB2			---		
S690W	TRBB1	180	60	---		
	TRBB2			---		
	TFBB1			---		
	TFBB2			2,0 mm		
S690M	TRBB1					---
	TRBB2					2,5 mm
	TFBB1					---
	TFBB2					---
S690H	TRBB1					---
	TRBB2					---
	TFBB1					---
	TFBB2					---
S960W	TRBB1	180	90	---		
	TRBB2			---		
	TFBB1			---		
	TFBB2			---		
S960M	TRBB1					---
	TRBB2					---
	TFBB1					---
	TFBB2					---
S960H	TRBB1					---
	TRBB2					---
	TFBB1					---
	TFBB2					1,8 mm
¹ TRBB – gięcie z rozciąganiem grani; TFBB – gięcie z rozciąganiem lica ² wymiar niezgodności (w postaci nieciągłości materiału); Brak uwagi = Pozytywny wynik próby						

Próby udarności

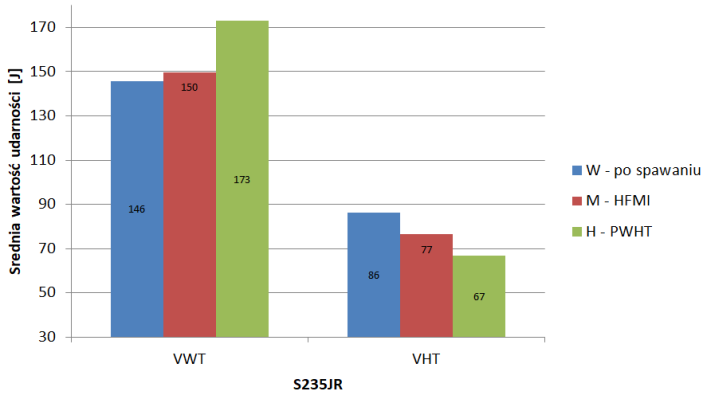
Aby określić odporność złącza na kruche pękanie, przeprowadzono próbę udarności dla każdego ze złączy spawanych z karbem typu V w temperaturze -20 °C zgodnie z normą PN-EN ISO 9016:2013-05 [12n]. Z każdej pospawanej płyty pobrano po 3 próbki

ze spoiny i SWC. Chłodzenie próbek do badania przeprowadzono w cyfrowo sterowanej oraz kalibrowanej chłodziarce zapewniającej agitację cieczy chłodzącej. Każda z próbek została złamana poprzez jednokrotne uderzenie młota typu VEB 300/150. Ze względu na typ młota odczyt wartości w trakcie próby był możliwy w jednostce kpd (kilo pundy) i konieczne było przeliczenie na pracę łamania wyrażoną w J – Joulach. Tabela 37 przedstawia zestawienie wyników prób. Rys. 71-75 przedstawiają porównanie średnich wartości pracy łamania w zależności od miejsca nacięcia karbu i typu płyty spawalniczej, z której pobrano próbkę. Próby udarności zakończyły się wynikiem pozytywnym dla wszystkich złączy.

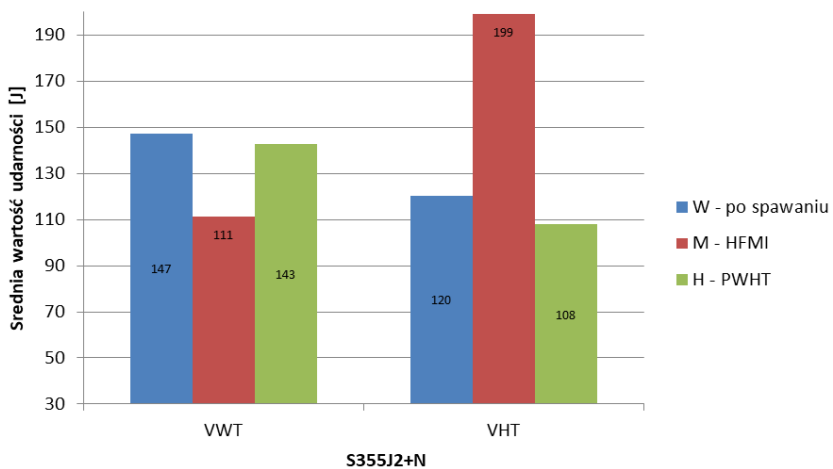
Tabela 37. Zestawienie wyników prób udarności dla złączy spawanych

Próba udarności w temperaturze -20°C						
Próbka	Typ próbki ¹	Udarność KV [J]	Przełom ³	Typ próbki ²	Udarność KV [J]	Przełom ³
S235W	VWT-1	122,6	M	VHT-1	108,9	M
	VWT-2	157,0	M	VHT-2	72,6	M
	VWT-3	157,9	M	VHT-3	77,5	M
S235M	VWT-1	160,9	M	VHT-1	84,4	M
	VWT-2	164,8	M	VHT-2	74,6	M
	VWT-3	123,6	M	VHT-3	70,6	M
S235H	VWT-1	174,6	M	VHT-1	58,9	M
	VWT-2	177,6	M	VHT-2	72,6	M
	VWT-3	166,8	M	VHT-3	68,7	M
S355W	VWT-1	147,2	M	VHT-1	142,2	M
	VWT-2	145,2	M	VHT-2	109,9	M
	VWT-3	149,1	M	VHT-3	108,9	M
S355M	VWT-1	107,9	M	VHT-1	207,6	M
	VWT-2	115,8	M	VHT-2	197,8	M
	VWT-3	109,9	M	VHT-3	191,3	M
S355H	VWT-1	146,2	M	VHT-1	113,8	M

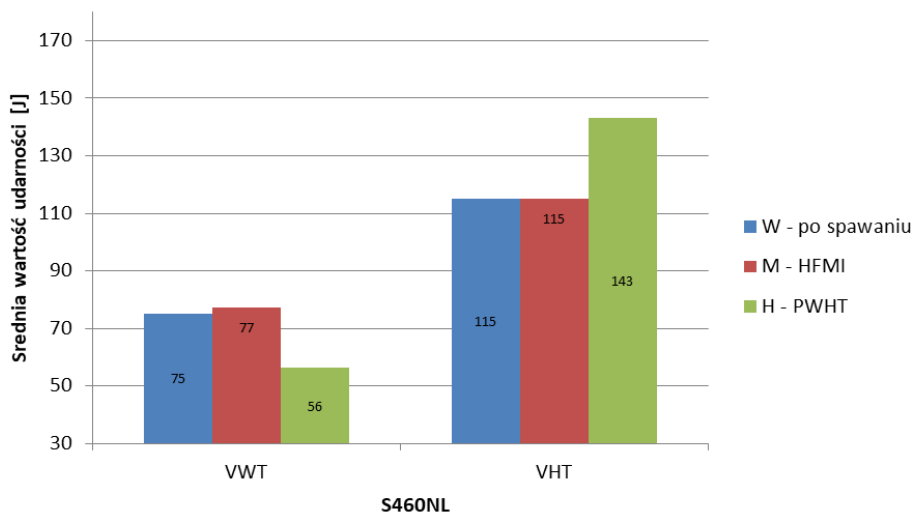
	VWT-2	140,3	M	VHT-2	141,3	M
	VWT-3	141,3	M	VHT-3	114,8	M
S460W	VWT-1	70,6	M	VHT-1	153,0	M
	VWT-2	84,4	M	VHT-2	100,1	M
	VWT-3	70,6	M	VHT-3	92,2	M
S460M	VWT-1	84,4	M	VHT-1	122,6	M
	VWT-2	73,6	M	VHT-2	110,9	M
	VWT-3	73,6	M	VHT-3	111,8	M
S460H	VWT-1	56,9	M	VHT-1	162,8	M
	VWT-2	56,9	M	VHT-2	158,9	M
	VWT-3	54,9	M	VHT-3	107,9	M
S690W	VWT-1	73,6	M	VHT-1	44,1	M
	VWT-2	78,5	M	VHT-2	51,0	M
	VWT-3	81,4	M	VHT-3	37,3	M
S690M	VWT-1	54,0	M	VHT-1	43,2	M
	VWT-2	68,7	M	VHT-2	39,2	M
	VWT-3	56,9	M	VHT-3	40,2	M
S690H	VWT-1	60,8	M	VHT-1	135,4	M
	VWT-2	68,7	M	VHT-2	137,3	M
	VWT-3	51,0	M	VHT-3	120,7	M
S960W	VWT-1	58,9	M	VHT-1	82,4	M
	VWT-2	54,9	M	VHT-2	79,5	M
	VWT-3	59,8	M	VHT-3	74,6	M
S960M	VWT-1	58,9	M	VHT-1	70,6	M
	VWT-2	58,9	M	VHT-2	66,7	M
	VWT-3	58,9	M	VHT-3	68,7	M
S960H	VWT-1	52,0	M	VHT-1	117,7	M
	VWT-2	96,1	M	VHT-2	116,7	M
	VWT-3	101,0	M	VHT-3	100,1	M
¹ VWT – Charpy z karbem V W – karb w metalu spoiny, T karb na grubości ² VHT – Charpy z karbem V H – karb w SWC, T karb na grubości ³ K – Kruchy, P – plastyczny, M - Mieszany						



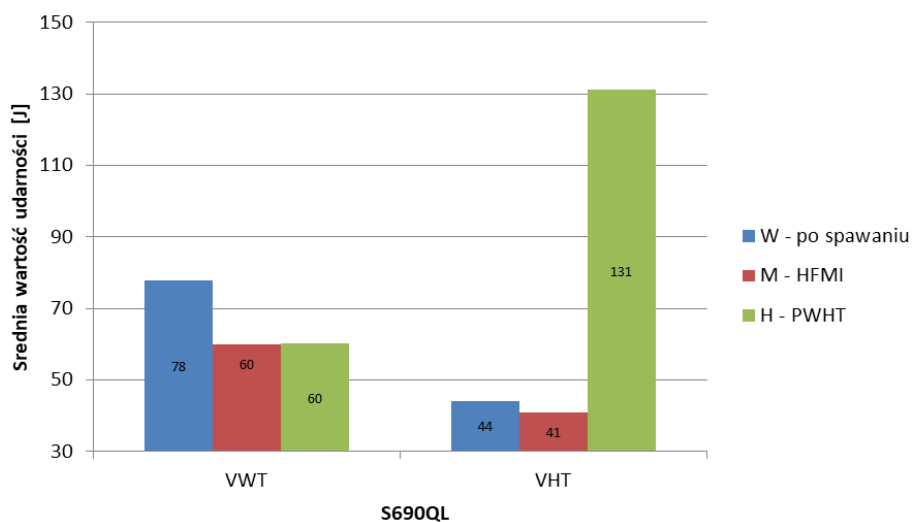
Rys. 71. Zestawienie porównawcze średnich wartości udarności dla połączeń spawanych ze stali S235JR



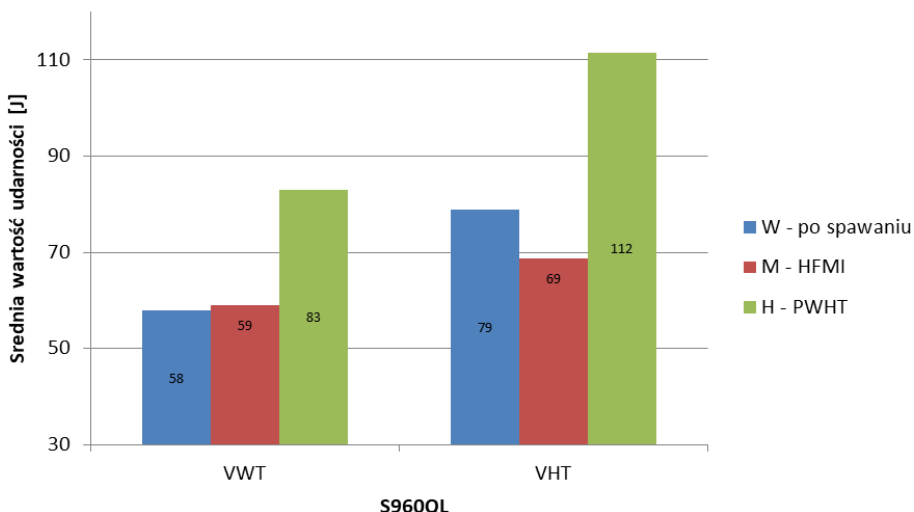
Rys. 72. Zestawienie porównawcze średnich wartości udarności dla połączeń spawanych ze stali S355J2+N



Rys. 73. Zestawienie porównawcze średnich wartości udarności dla połączeń spawanych ze stali S460NL



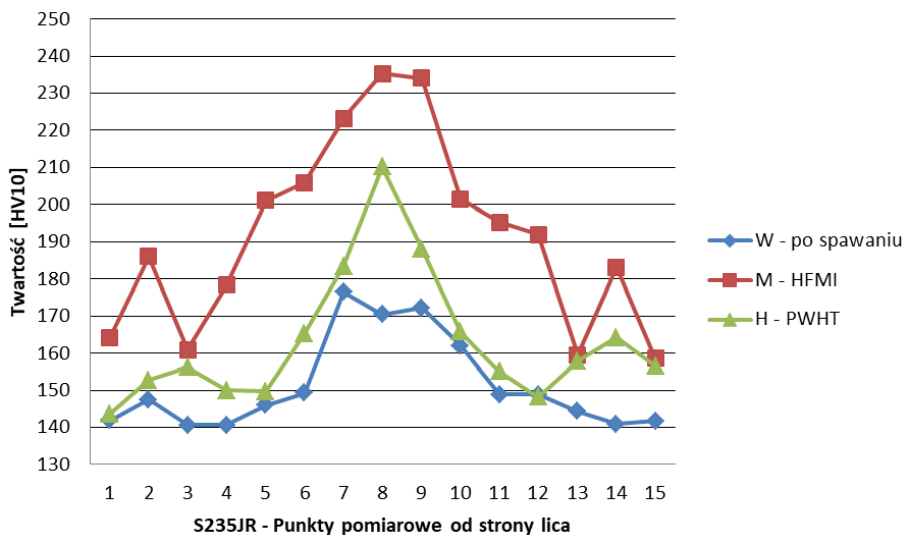
Rys.74. Zestawienie porównawcze średnich wartości udarności dla połączeń spawanych ze stali S690QL



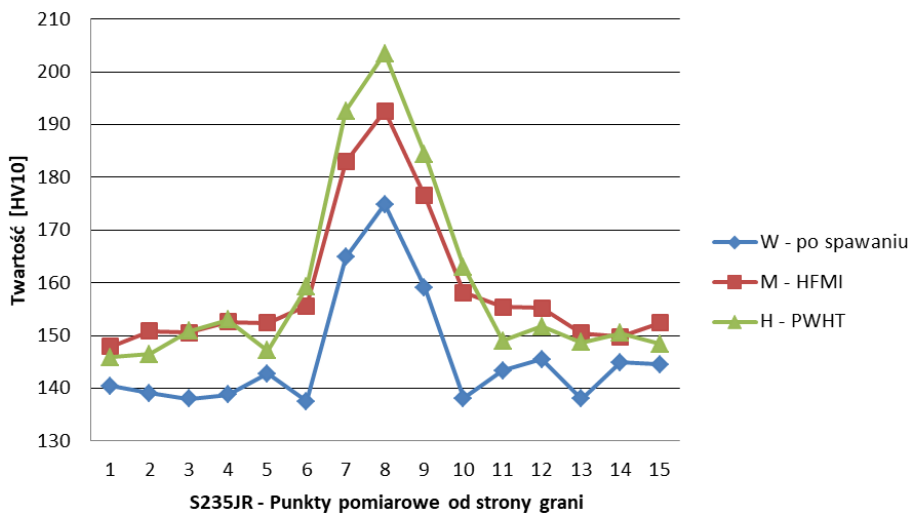
Rys. 75. Zestawienie porównawcze średnich wartości udarności dla połączeń spawanych ze stali S960QL

Pomiary twardości

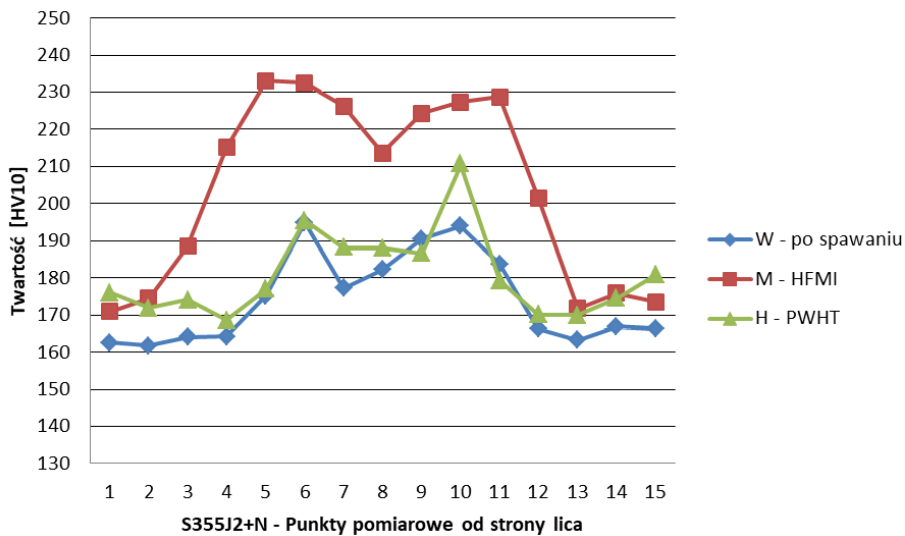
Pomiar twardości na przekroju złącza spawanego przeprowadzono metodą Vickers'a zgodnie z PN-EN ISO 9015-1:2011 [13n] przy obciążeniu HV10. Wyniki pomiarów twardości przedstawione zostały w postaci wykresów porównawczych. Przedstawiono na nich średnie wartości dla poszczególnych typów połączeń spawanych i zastosowanych procesów towarzyszących, (Rys. 76-85).



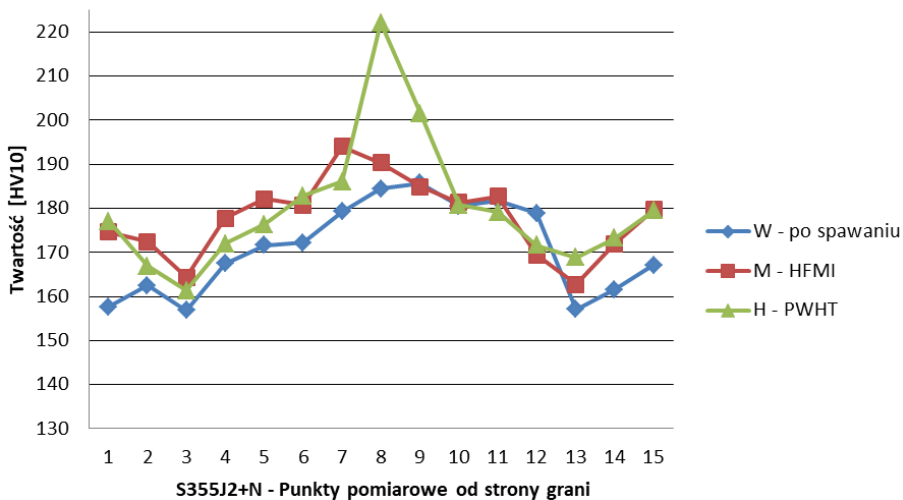
Rys. 76. Rozkład twardości dla linii pomiarowej od strony lica próbek S235JR



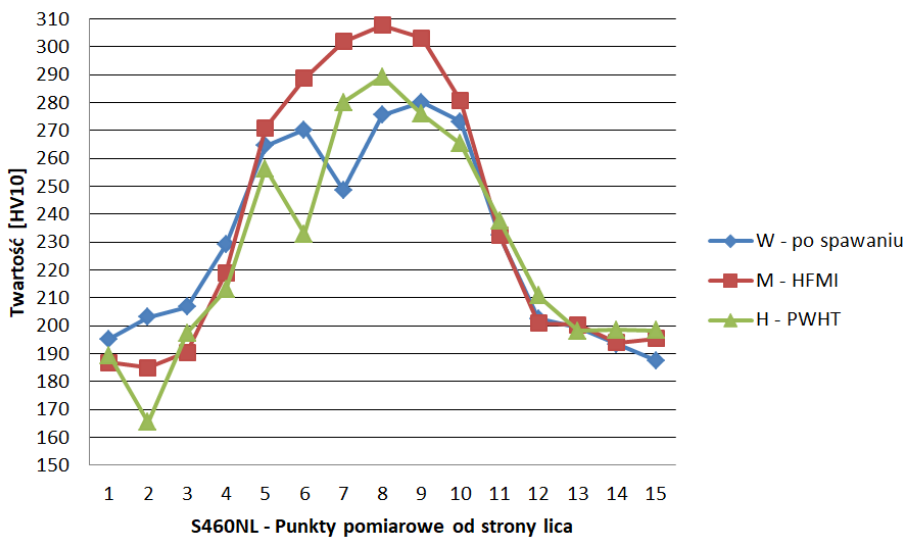
Rys. 77. Rozkład twardości dla linii pomiarowej od strony grani próbek S235JR



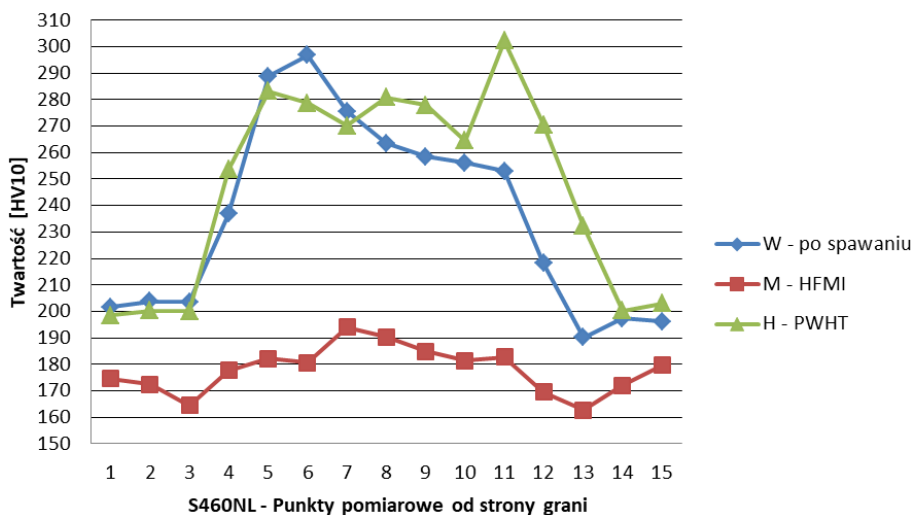
Rys. 78. Rozkład twardości dla linii pomiarowej od strony lica próbek S355J2+N



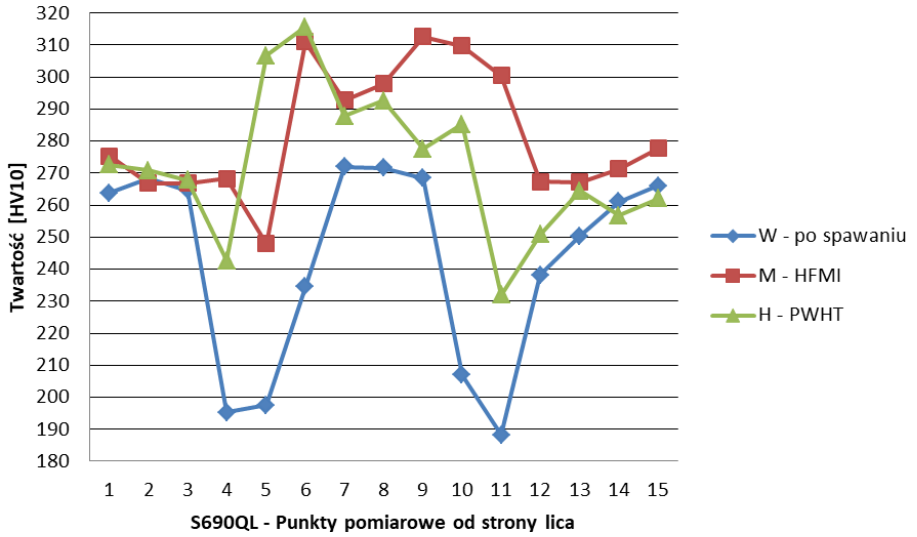
Rys. 79. Rozkład twardości dla linii pomiarowej od strony grani próbek S355J2+N



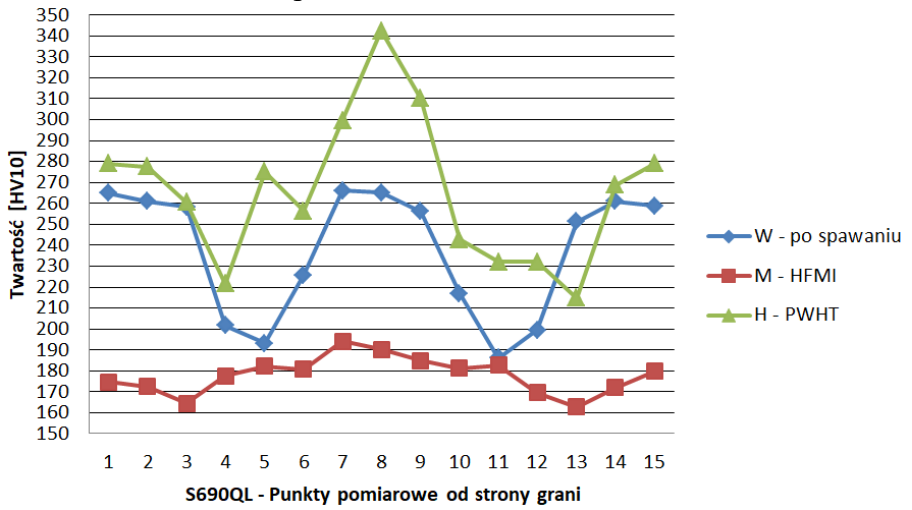
Rys. 80. Rozkład twardości dla linii pomiarowej od strony lica próbek S460NL



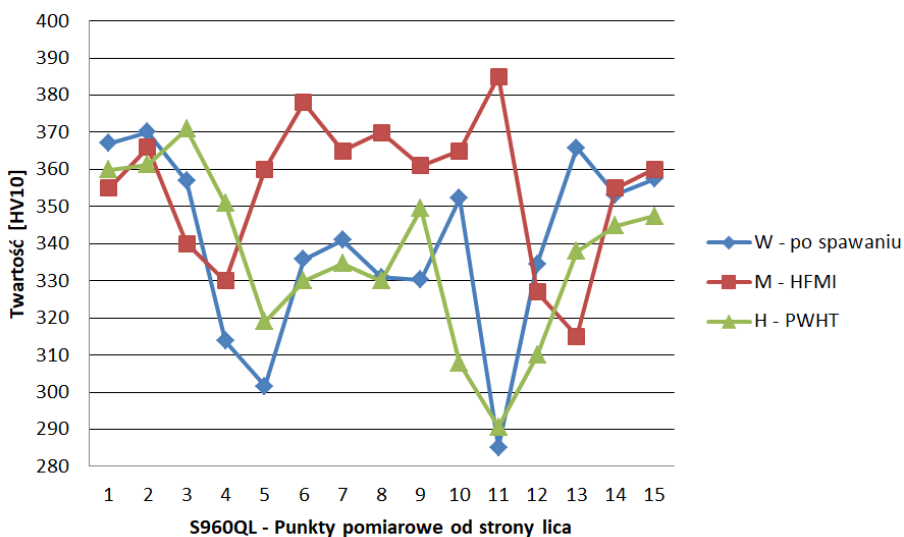
Rys. 81. Rozkład twardości dla linii pomiarowej od strony grani próbek S460NL



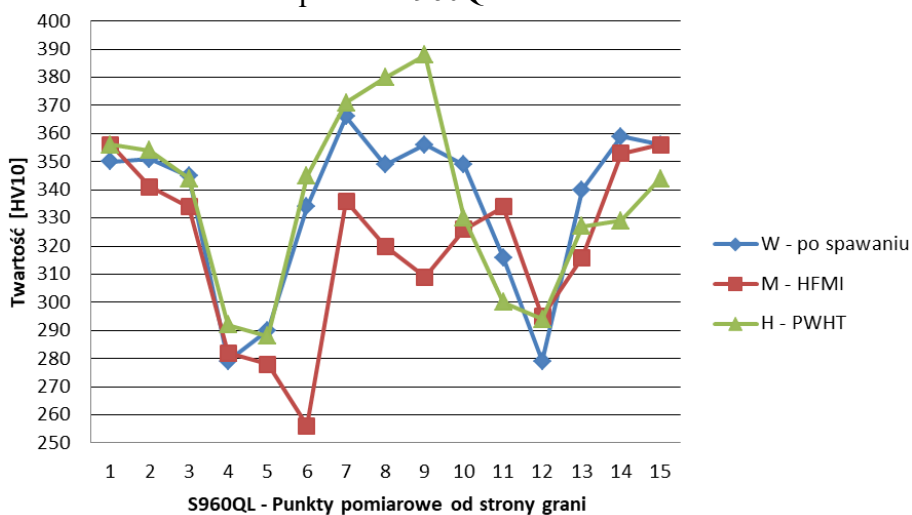
Rys. 82. Rozkład twardości dla linii pomiarowej od strony lica próbek S690QL



Rys. 83. Rozkład twardości dla linii pomiarowej od strony grani próbek S690QL



Rys. 84. Rozkład twardości dla linii pomiarowej od strony lica próbek S960QL



Rys. 85. Rozkład twardości dla linii pomiarowej od strony grani próbek S960QL

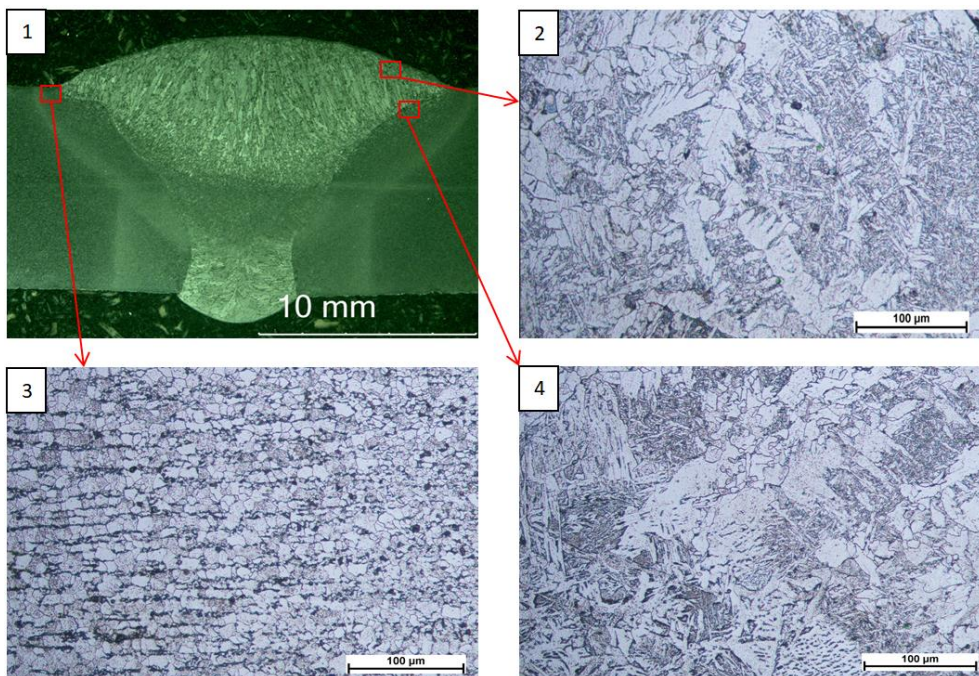
5.2. Struktura badanych złączy doczołowych

Mikroskopia świetlna – obserwacja mikrostruktury

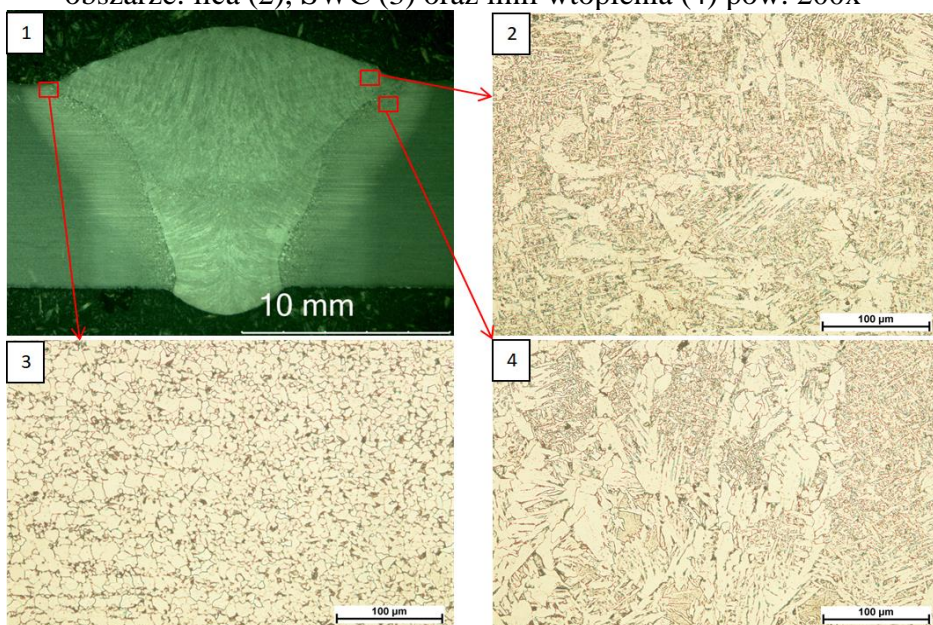
W celu określenia poprawności wykonania złączy spawanych oraz konsekwencji poszczególnych konfiguracji spawania (w stanie po spawaniu oraz po przekuwaniu po spawaniu) , przeprowadzono badania metalograficzne obejmujące obserwację w polu jasnym na mikroskopie świetlnym.

W pierwszym etapie wykonano makro-zdjęcia przy powiększeniu x8 celem oceny czy w wykonane złącza spawane nie posiadają niezgodności wewnętrznych takich jak np. makropęknięcia. Kolejnym etapem była ocena mikrostruktury przy powiększeniu x200 celem określenia różnic w mikrostrukturze próbek po przekuwaniu i w stanie po spawaniu i po wyżarzaniu odprężającym. Zgłady do badań metalograficznych zostały pobrane z każdego typu złącza spawanego, przeszlifowane i polerowane, a następnie trawione chemicznie w 3% roztworze kwasu azotowego w alkoholu etylowym – Nitalu, w czasie od 5 do 20 sekund w zależności od typu złącza spawanego.

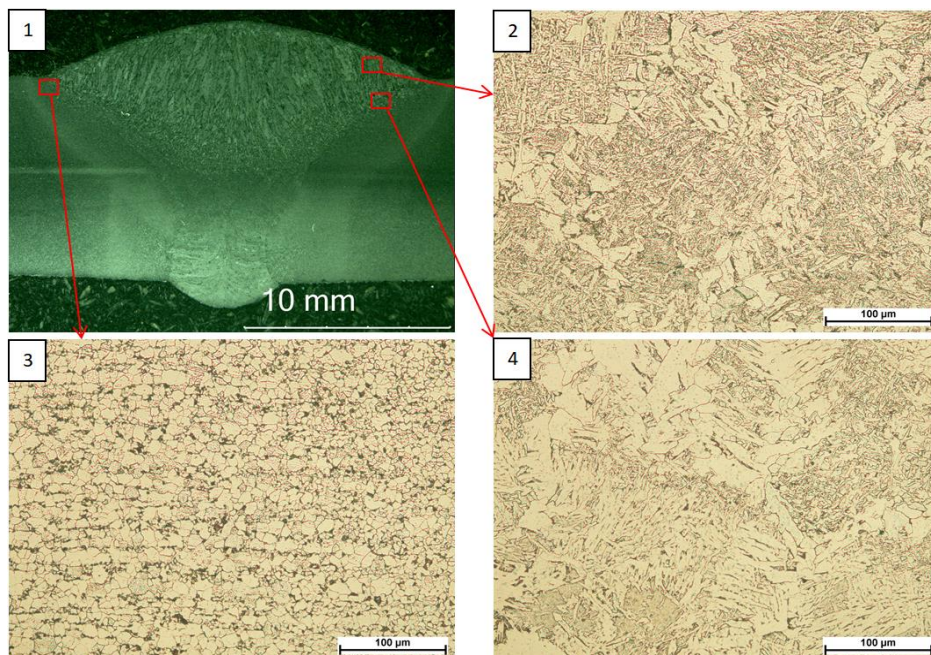
Obserwacje na mikroskopie świetlnym, (Rys. 86-100) nie wykazały obecności niedopuszczalnych niezgodności na przekroju złączy spawanych. W przypadku złączy poddanych przekuwaniu o wysokiej częstotliwości można zaobserwować łagodniejszą strefę przejścia z materiału rodzimego do lica spoiny spowodowaną zastosowanym procesem.



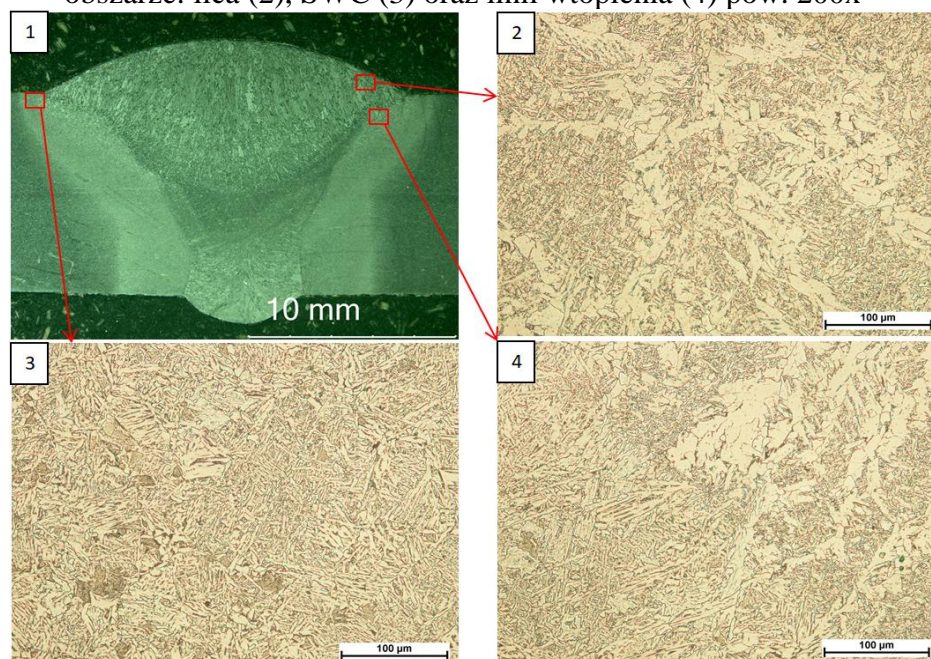
Rys. 86. Makrostruktura złącza S235W (1), mikrostruktura w obszarze: lica (2), SWC (3) oraz linii wtopienia (4) pow. 200x



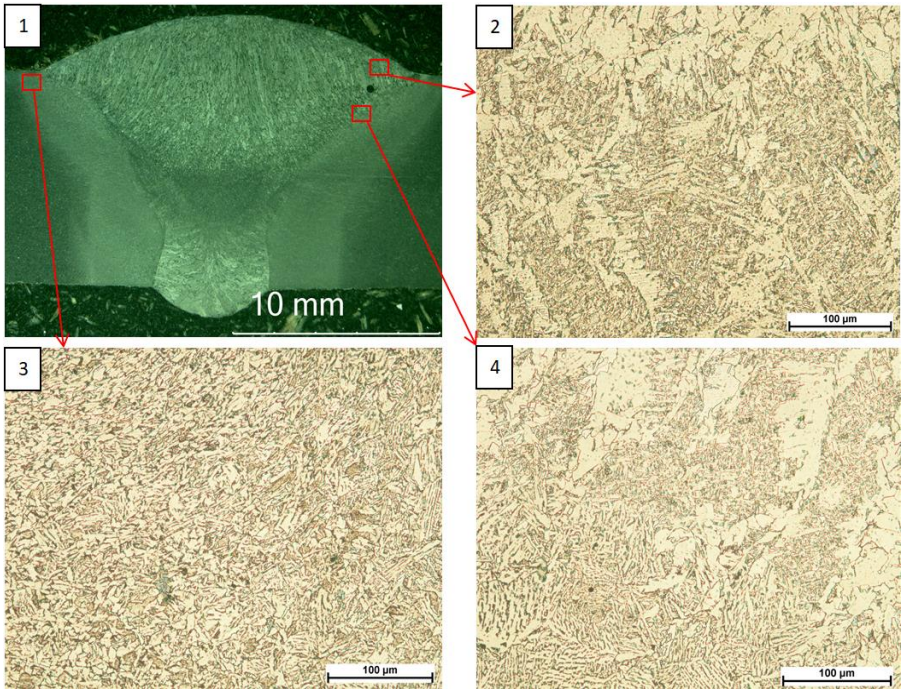
Rys. 87. Makrostruktura złącza S235M (1), mikrostruktura w obszarze: lica (2), SWC (3) oraz linii wtopienia (4) pow. 200x



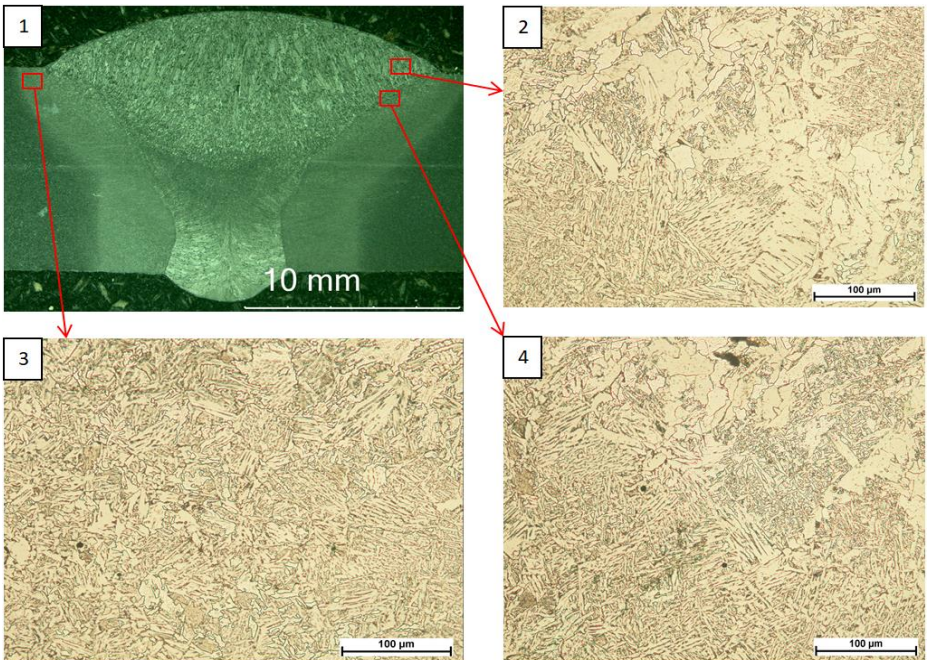
Rys. 88. Makrostruktura złącza S235H (1), mikrostruktura w obszarze: lica (2), SWC (3) oraz linii wtopienia (4) pow. 200x



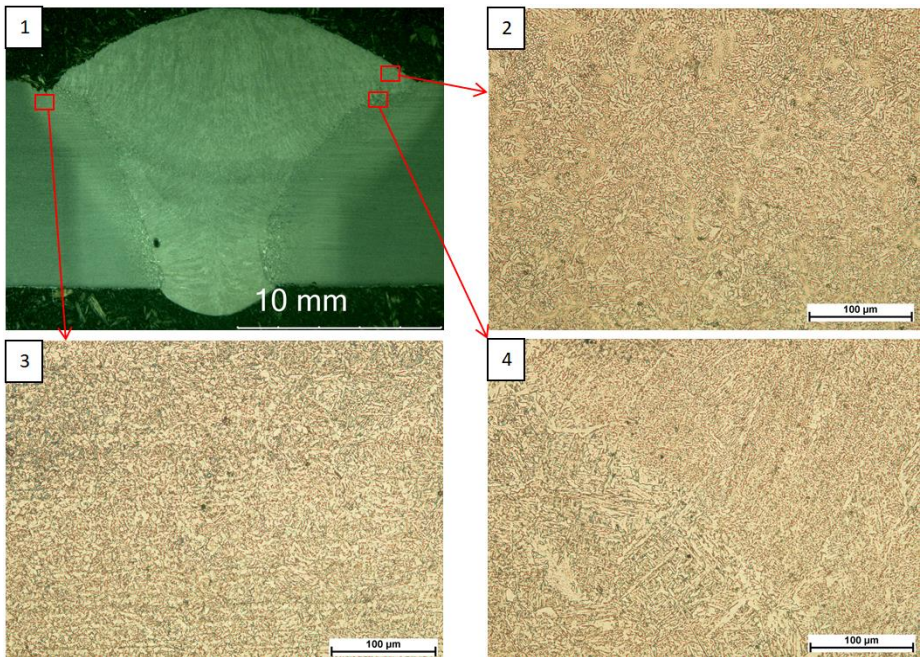
Rys. 89. Makrostruktura złącza S355W (1), mikrostruktura w obszarze: lica (2), SWC (3) oraz linii wtopienia (4) pow. 200x



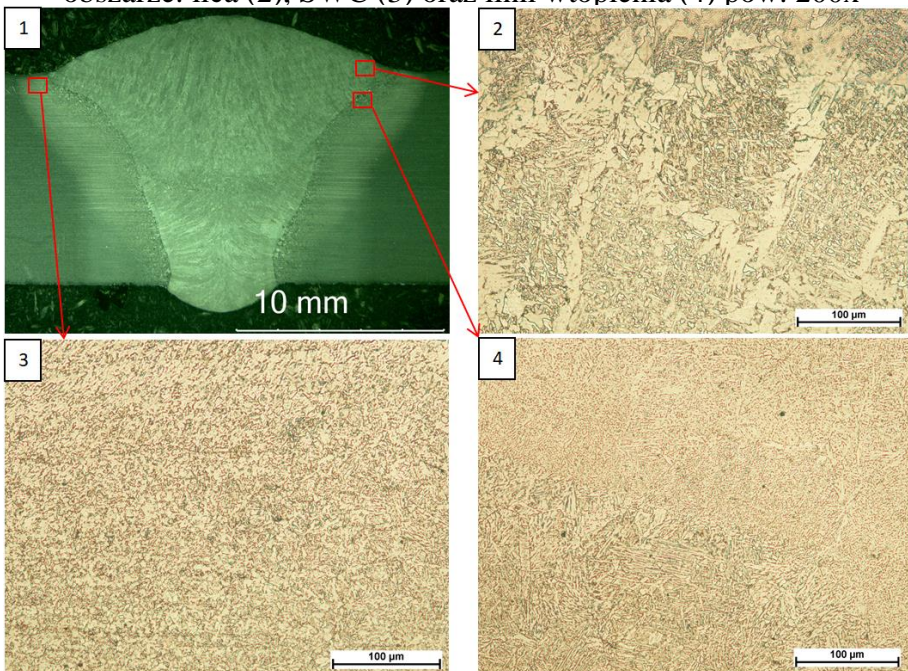
Rys. 90. Makrostruktura złącza S355M (1), mikrostruktura w obszarze: lica (2), SWC (3) oraz linii wtopienia (4) pow. 200x



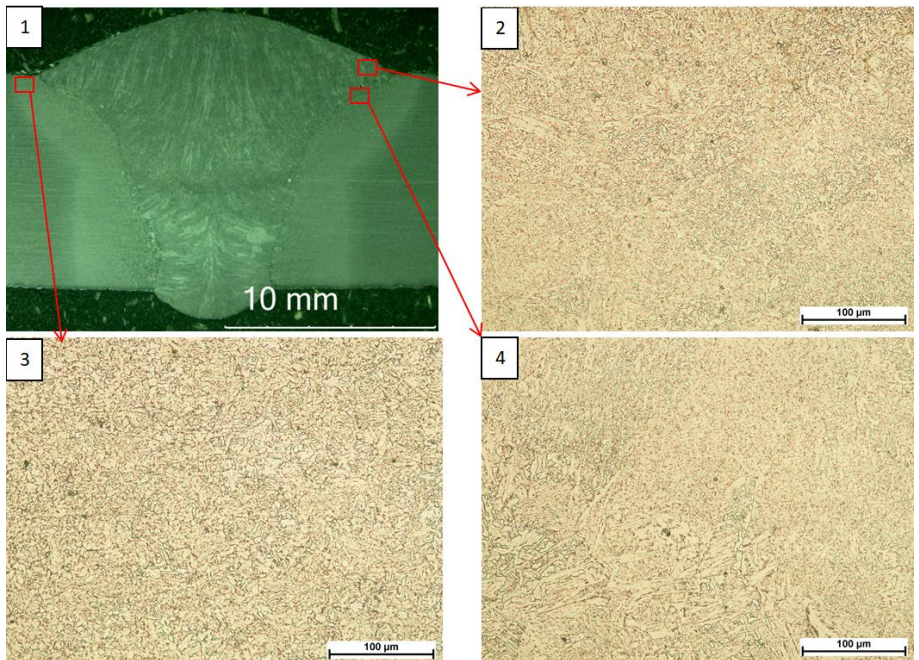
Rys. 91. Makrostruktura złącza S355H (1), mikrostruktura w obszarze: lica (2), SWC (3) oraz linii wtopienia (4) pow. 200x



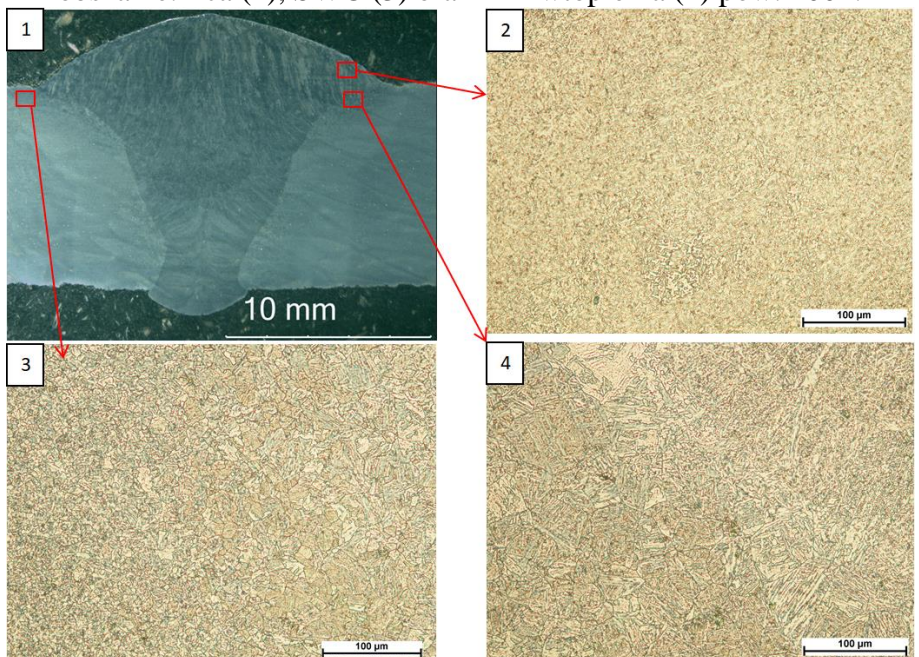
Rys. 92. Makrostruktura złącza S460W (1), mikrostruktura w obszarze: lica (2), SWC (3) oraz linii wtopienia (4) pow. 200x



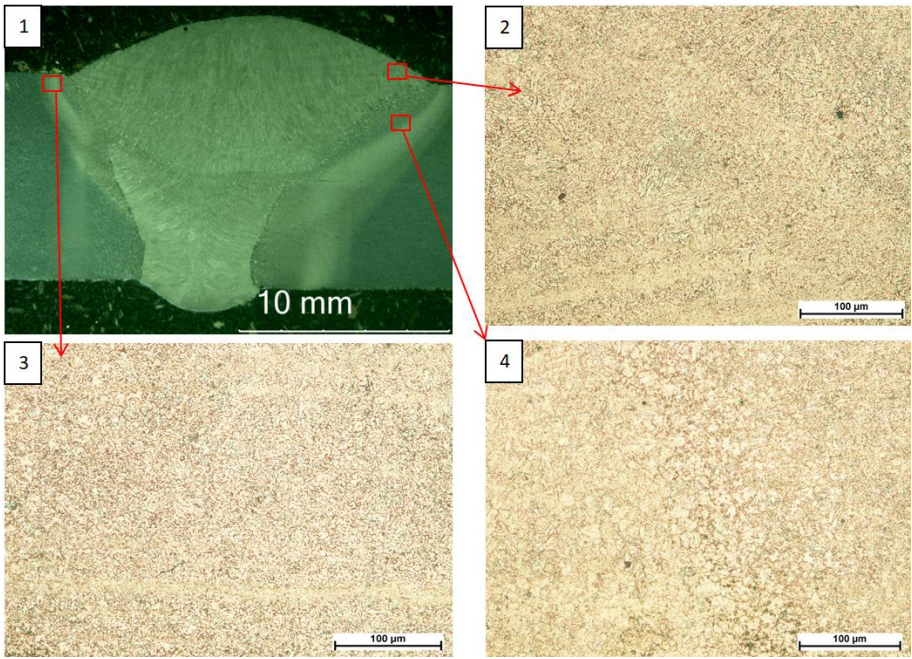
Rys. 93. Makrostruktura złącza S460M (1), mikrostruktura w obszarze: lica (2), SWC (3) oraz linii wtopienia (4) pow. 200x



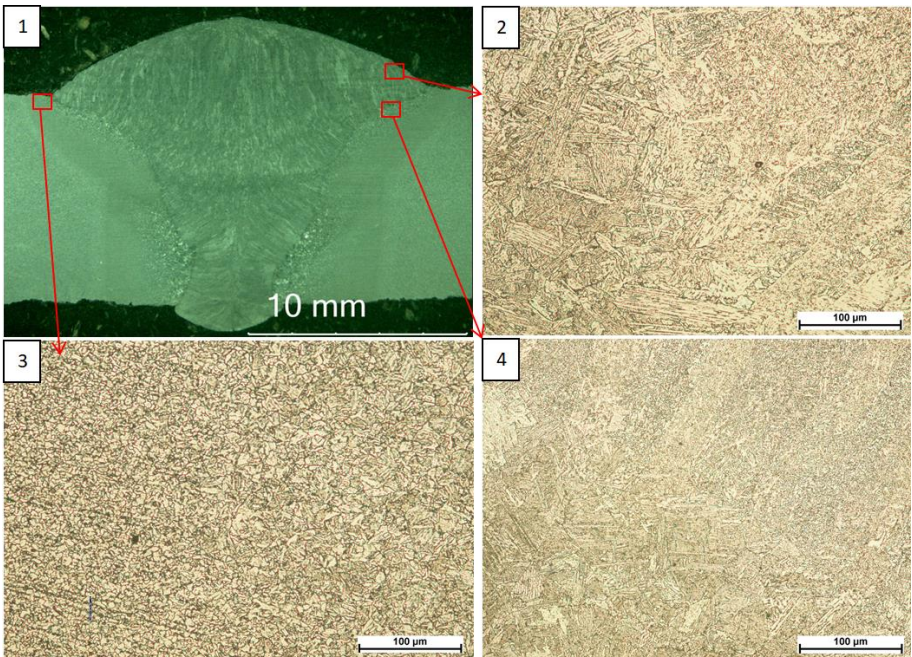
Rys. 94. Makrostruktura złącza S460H (1), mikrostruktura w obszarze: lica (2), SWC (3) oraz linii wtopienia (4) pow. 200x.



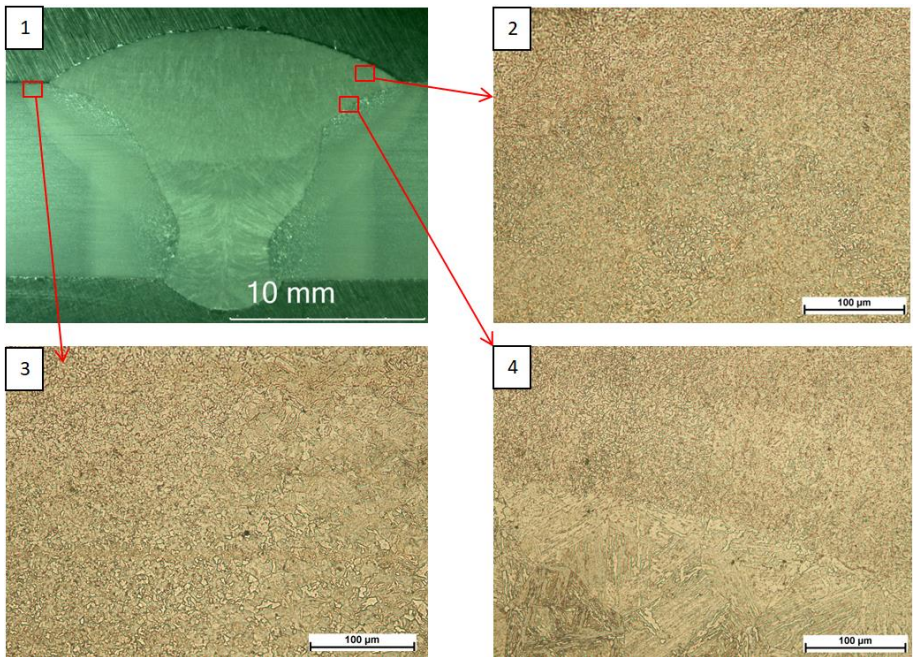
Rys. 95. Makrostruktura złącza S690W (1), mikrostruktura w obszarze: lica (2), SWC (3) oraz linii wtopienia (4) pow. 200x



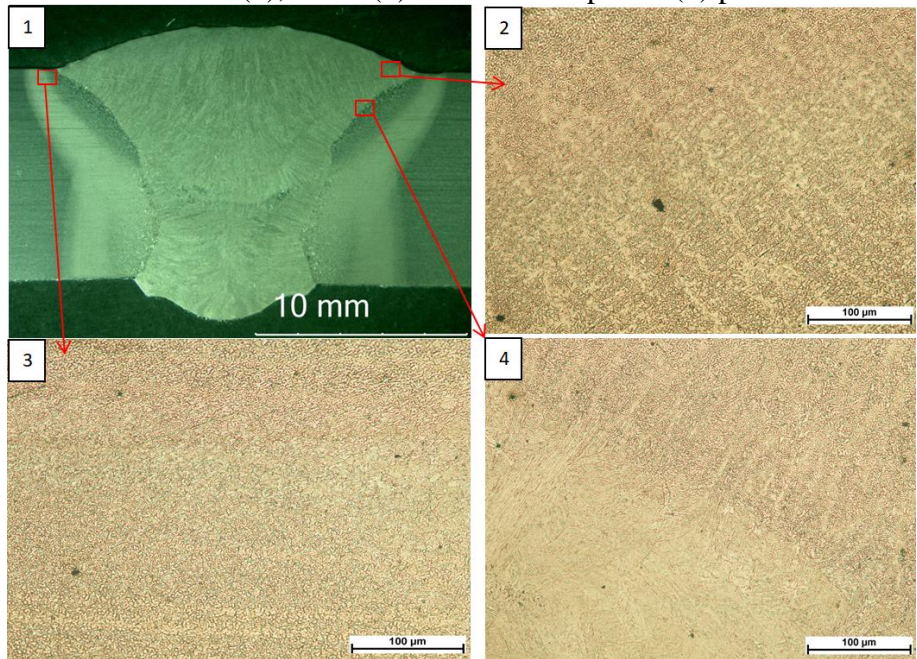
Rys. 96. Makrostruktura złącza S690M (1), mikrostruktura w obszarze: lica (2), SWC (3) oraz linii wtopienia (4) pow. 200x



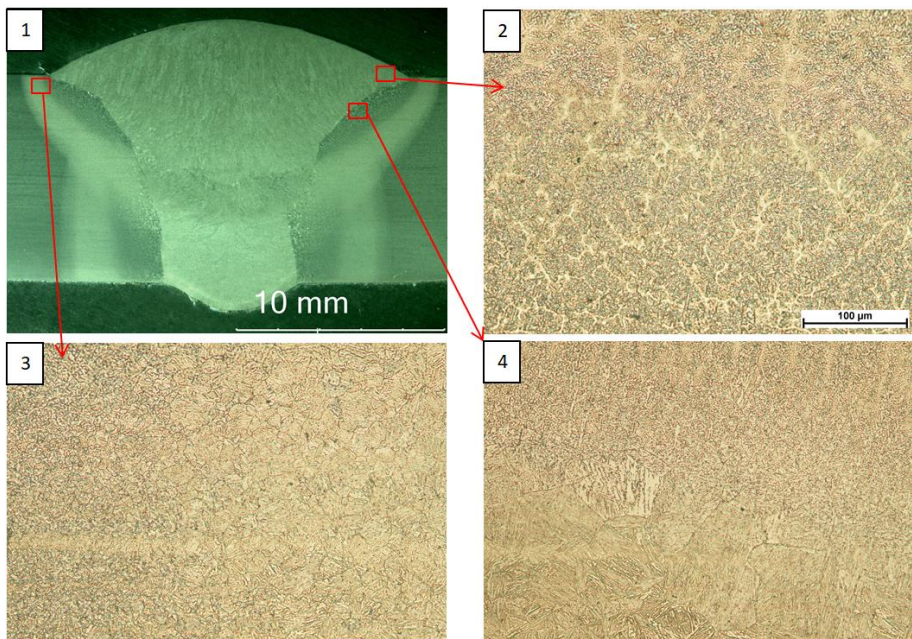
Rys. 97. Makrostruktura złącza S690H (1), mikrostruktura w obszarze: lica (2), SWC (3) oraz linii wtopienia (4) pow. 200x



Rys. 98. Makrostruktura złącza S960W (1), mikrostruktura w obszarze: lica (2), SWC (3) oraz linii wtopienia (4) pow. 200.



Rys. 99. Makrostruktura złącza S960M (1), mikrostruktura w obszarze: lica (2), SWC (3) oraz linii wtopienia (4) pow. 200x



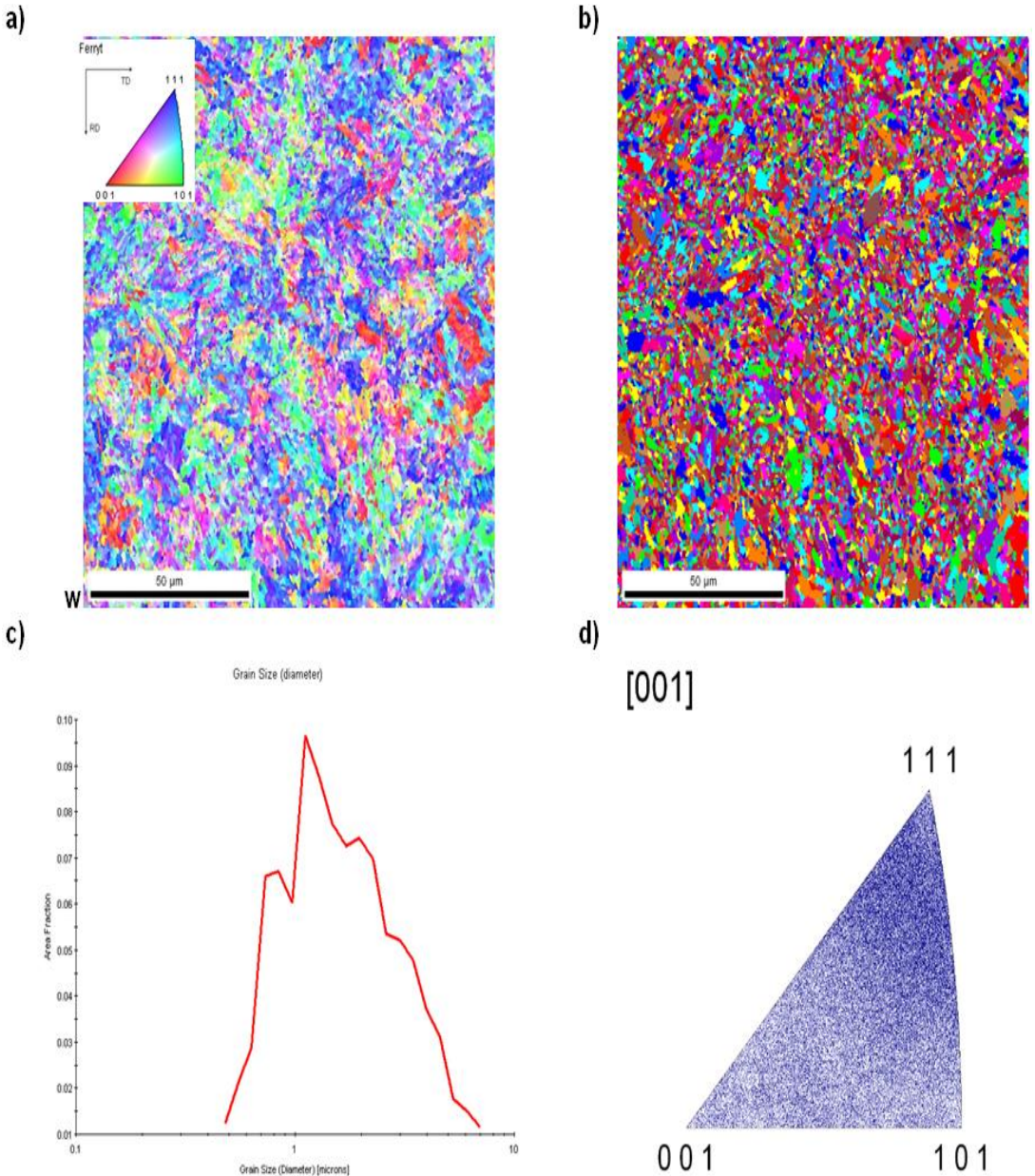
Rys. 100. Makrostruktura złącza S960H (1), mikrostruktura w obszarze: lica (2), SWC (3) oraz linii wtopienia (4) pow. 200x

Analiza mikrostruktury wybranych próbek z wykorzystaniem dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych EBSD

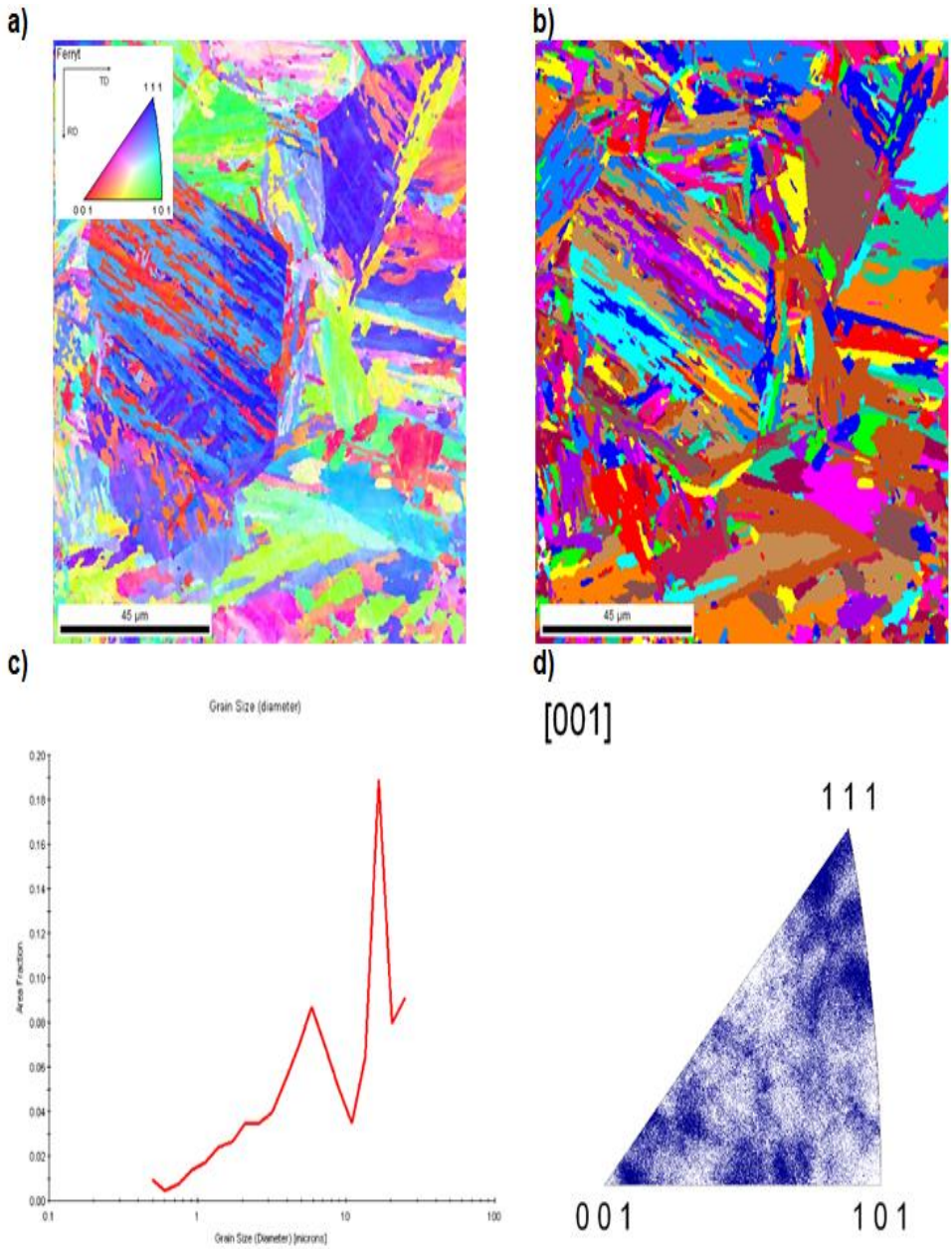
Wyniki analizy strukturalnej z wykorzystaniem dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych (EBSD) przedstawiono na rysunkach 101-103. Struktura stali S960QL, w obszarze materiału rodzimego charakteryzuje się osnową ferrytyczną o wielkości ziarna w zakresie około 1-10 μm , (Rys. 101c).

W przypadku próbki S960W, w obszarze linii wtopienia i SWC stwierdzono rozrost ziarn ferrytu do wielkości w zakresie około 5-30 μm (Rys. 102c). Na podstawie analizy wyników odwrotnych figur biegunowych (Rys. 103e oraz 103f), w strukturze linii wtopienia i SWC zidentyfikowano teksturę i zaobserwowano orientacje o niewielkim nasileniu w kierunkach $[1\ 1\ 1]$ i $[0\ 0\ 1]$.

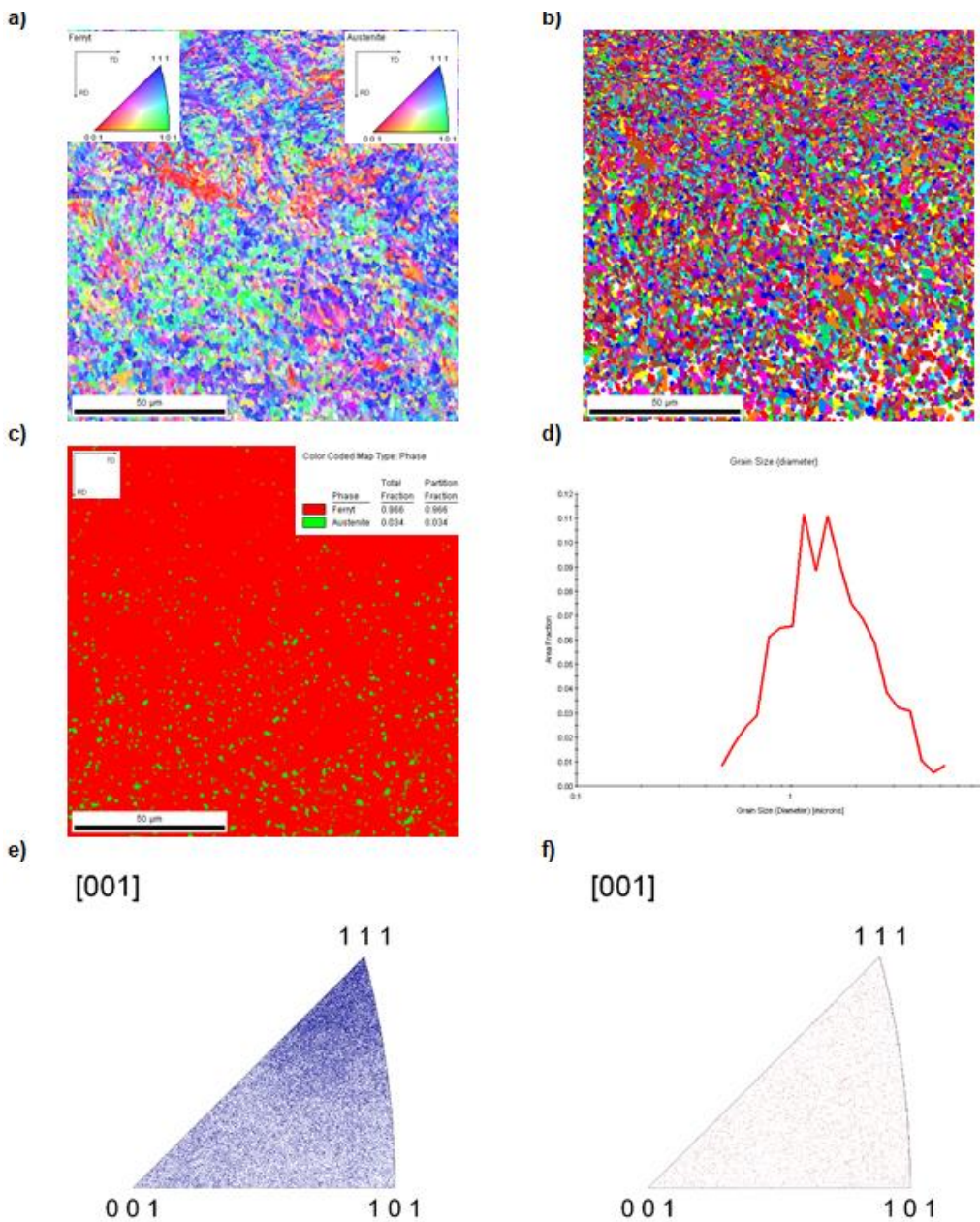
W przypadku próbki 960M w obszarze linii wtopienia i SWC stwierdzono występowanie zarówno ferrytu o wielkości ziarn w zakresie około 0,7-1,5 μm , jak i nielicznych ziarn austenitu, (Rys. 103d). Udział ilościowy ferrytu wynosi ok. 96,6%, a austenitu ok. 3,4%, (Rys. 103c). Na podstawie analizy wyników odwrotnych figur biegunowych, (Rys. 103), w strukturze materiału rodzimego i w SWC nie zaobserwowano uprzywilejowanej orientacji ziarn.



Rys. 101. Analiza strukturalna EBSD stali S960QL w obszarze materiału rodzimego: a) IPF mapa orientacji krystalograficznej ziaren ferrytu, b) mapa ziaren, c) rozkład wielkości ziarna, d) odwrotna figura biegunowa dla kierunku [0 0 1] - ferryt



Rys. 102. Analiza strukturalna EBSD próbki S960W w obszarze przetopienia: a) IPF mapa orientacji krystalograficznej ziaren ferrytu, b) widok ziaren, c) rozkład wielkości ziarna, d) odwrotna figura biegunowa dla kierunku [0 0 1] - ferryt



Rys. 103. Analiza strukturalna EBSD stali S960M w obszarze przetopienia: a) IPF mapa orientacji krystalograficznej ziaren, b) widok ziaren, c) mapa fazowa ferrytu i austenitu, d) rozkład wielkości ziarna, e) odwrotna figura biegunowa dla kierunku [0 0 1] - ferryt, f) odwrotna figura biegunowa dla kierunku [0 0 1] - austenit

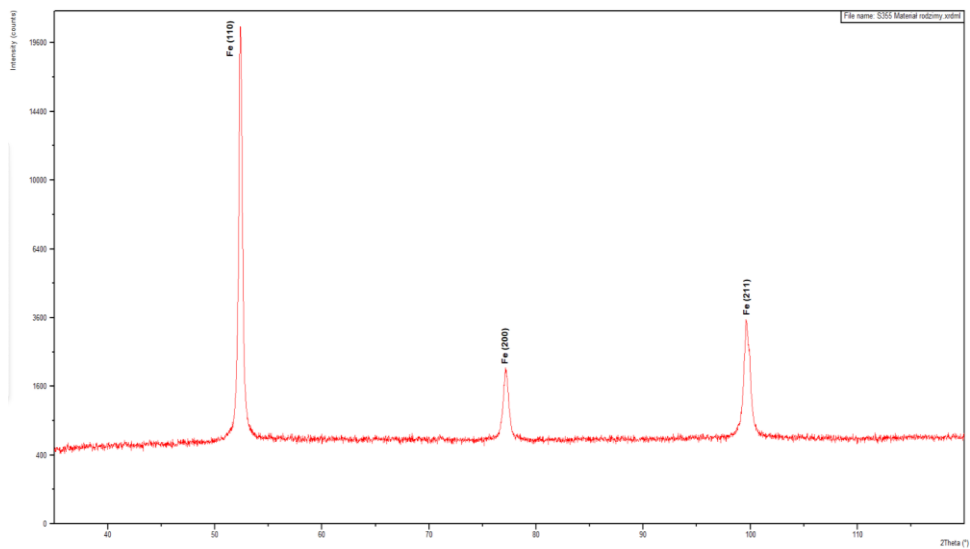
5.3. Analiza składu fazowego oraz pomiar stanu naprężeń z wykorzystaniem dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego w złączach doczołowych

Badania z wykorzystaniem techniki dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego (XRD) przeprowadzono z wykorzystaniem dyfraktometru wytwarzającego promieniowanie $\text{Co K}\alpha$ przechodzące przez filtr ($\lambda=1,79021 \text{ \AA}$), Jakościową analizę fazową wykonano dla wszystkich 15 płyt próbnych. Celem tej analizy było określenie składu fazowego dla materiału podstawowego jak również dla materiału spoiny. Uzyskane wyniki dla materiału podstawowego każdej z badanych próbek reprezentujących materiał rodzimy, potwierdziły występowanie odbić dyfrakcyjnych (linii dyfrakcyjnych) pochodzących od rodziny płaszczyzn krystalograficznych (110), (200) oraz (211) charakterystycznych dla ferrytu, (Rys. 104-108). Uzyskane wyniki dla materiału spoiny złączy ze stali S235JR, S355J2+N oraz S460NL również potwierdziły występowanie odbić dyfrakcyjnych (linii dyfrakcyjnych) pochodzących od rodziny płaszczyzn krystalograficznych (110), (200) oraz (211) charakterystycznych dla ferrytu. Wyniki uzyskane dla materiału spoiny złączy ze stali S690QL oraz S960QL oprócz występowania odbić dyfrakcyjnych (linii dyfrakcyjnych) pochodzących od rodziny płaszczyzn krystalograficznych (110), (200) oraz (211) charakterystycznych dla ferrytu, potwierdziły także występowanie rodziny płaszczyzn krystalograficznych (111) (Rys. 109) oraz (111) i (200) charakterystycznych dla austenitu $\text{Fe-}\gamma$ (Rys. 110, 111). Udział objętościowy austenitu mieści się w zakresie od 2 do 4%, osiągając najwyższą wartość dla spoiny w próbce S960QL w stanie po

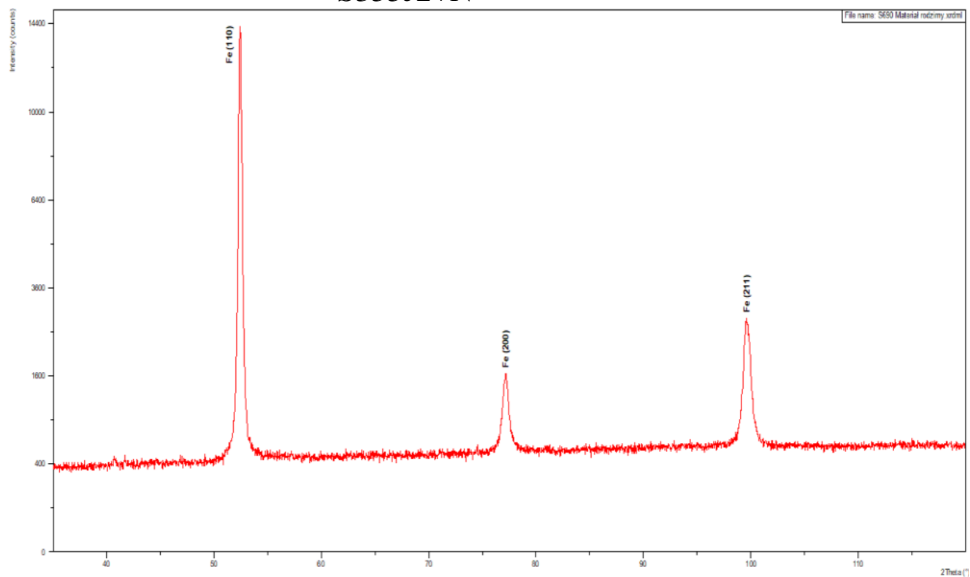
spawaniu. Austenit występujący w tych dwóch przypadkach dla spoin może być spowodowany obecnością wyższej zawartości niklu w materiale dodatkowym IMT NiMoCr oraz ED-FK 1000 i stabilizacją fazy austenitycznej.

W celu wyznaczenia rozkładu naprężeń po spawaniu oraz przekuwaniu z wysoką częstotliwością wytypowano próbki ze stali S960QL, dla których wykonano badania rentgenowskie z zastosowaniem metody $\sin^2\psi$. Wyniki badań pozwoliły na wyznaczenie naprężeń własnych w kierunku zgodnym z kierunkiem spawania. Wykonane pomiary oraz ich wyniki zaprezentowane są na Rys. 112-117.

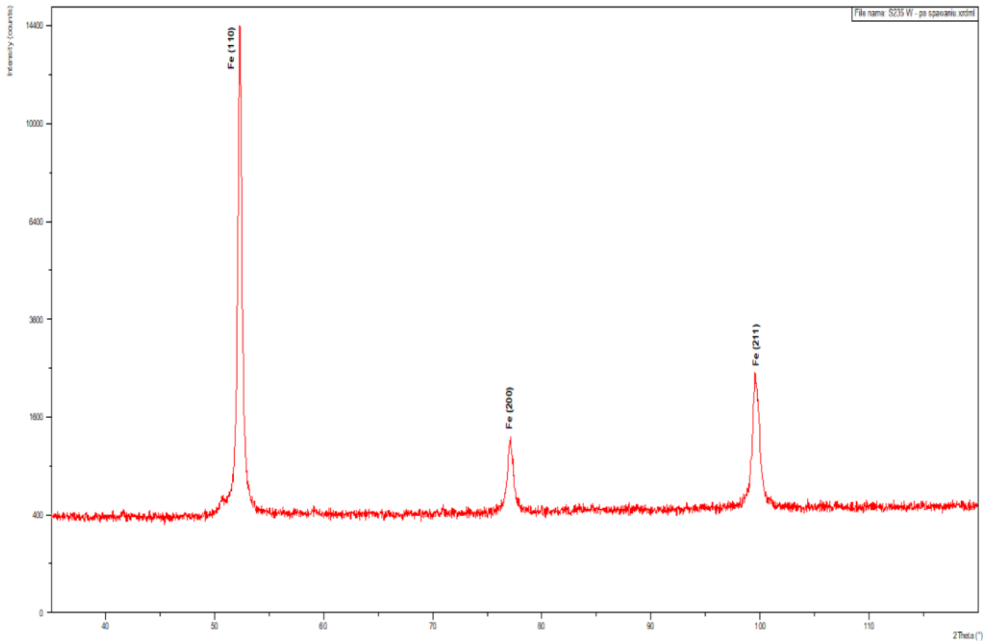
Na podstawie zaprezentowanych wyników uznano, że w obszarze poddanym przekuwaniu o wysokiej częstotliwości (próbka o oznaczeniu S960M) występują naprężenia ściskające w zakresie od ok. -158 MPa do -206 MPa w kierunku zgodnym z kierunkiem spawania. (Rys. 112-113). W próbkach pobranych ze spoiny w stanie po spawaniu nie poddanej żadnej dodatkowej obróbce występują naprężenia rozciągające od ok. +85 MPa do +247 MPa, (Rys. 114-115). Dla materiału rodzimego w obszarze linii wtopienia po przekuwaniu występują naprężenia ściskające o wartości ok. -407 MPa, (Rys. 116), podczas gdy dla tego samego obszaru linii wtopienia złącza w stanie po spawaniu występują naprężenia ściskające o wartości ok. -278 MPa, (Rys. 117).



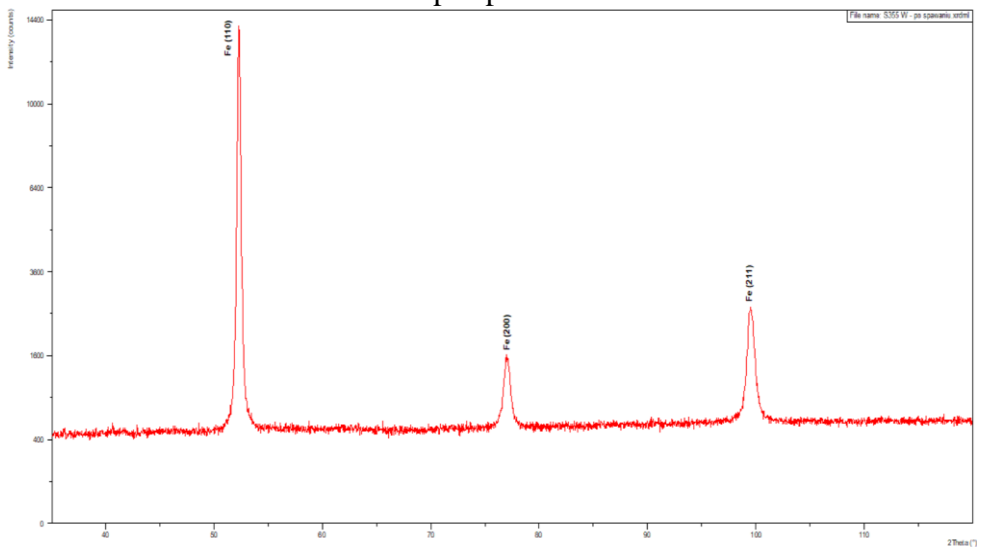
Rys. 104. Dyfraktogram zarejestrowany dla materiału rodzimego S355J2+N



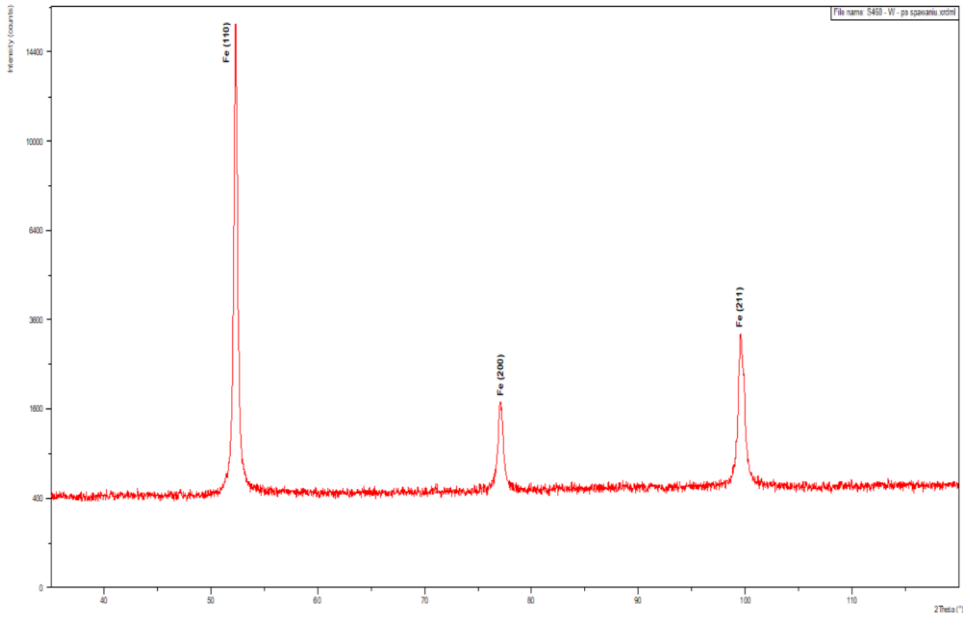
Rys. 105. Dyfraktogram zarejestrowany dla materiału rodzimego S690QL



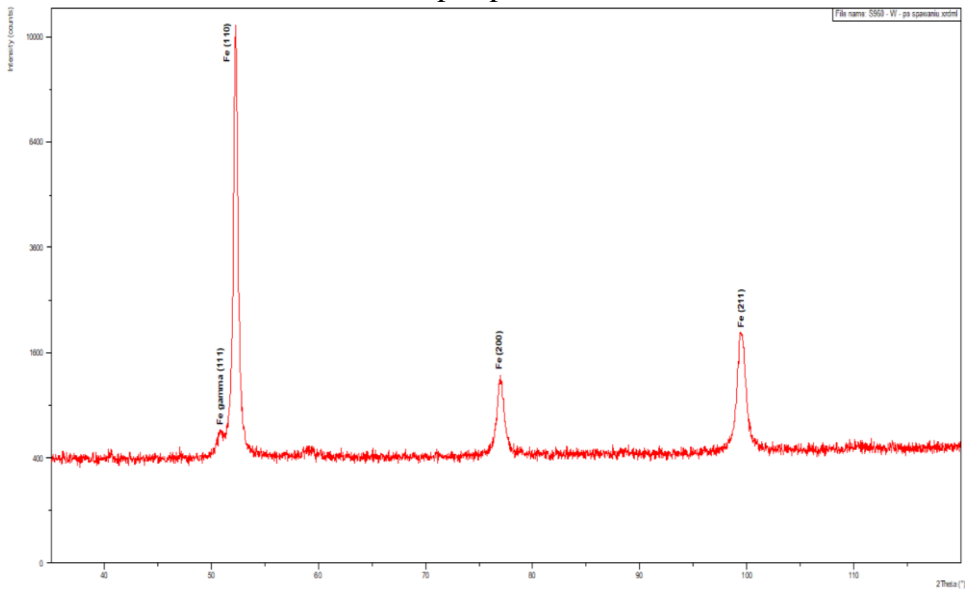
Rys. 106. Dyfraktogram zarejestrowany dla spoiny próbki S235JR w stanie po spawaniu



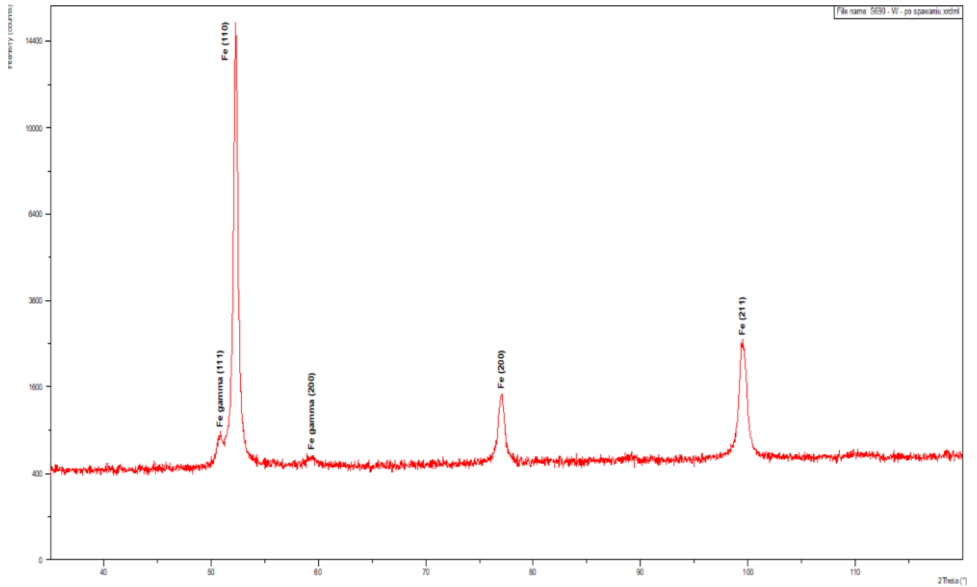
Rys. 107. Dyfraktogram zarejestrowany dla spoiny próbki S355J2+N w stanie po spawaniu



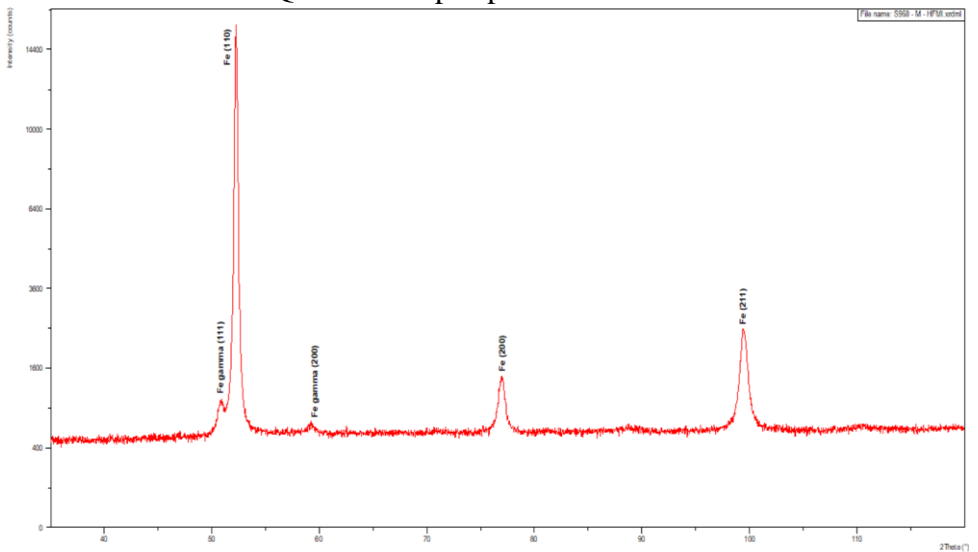
Rys. 108. Dyfraktogram zarejestrowany dla spoiny próbki S460NL w stanie po spawaniu



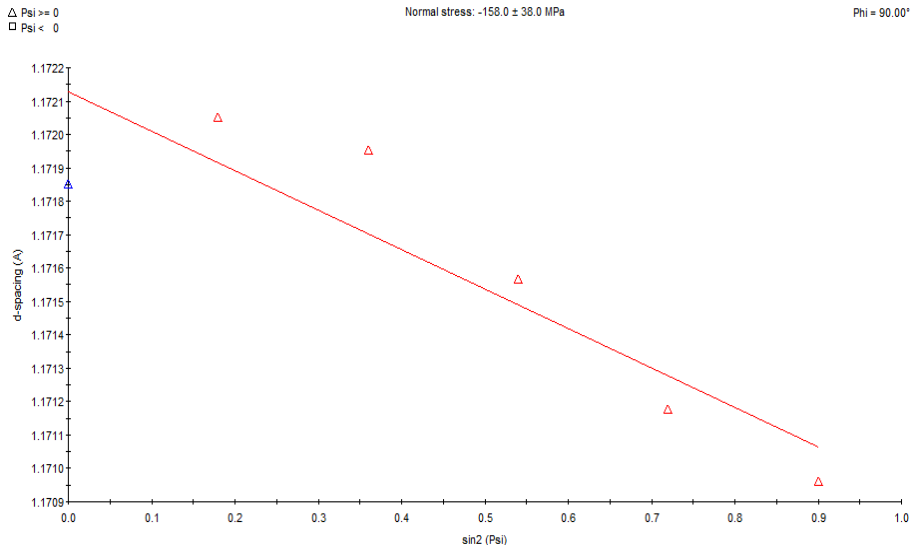
Rys. 109. Dyfraktogram zarejestrowany dla spoiny próbki S960QL w stanie po spawaniu



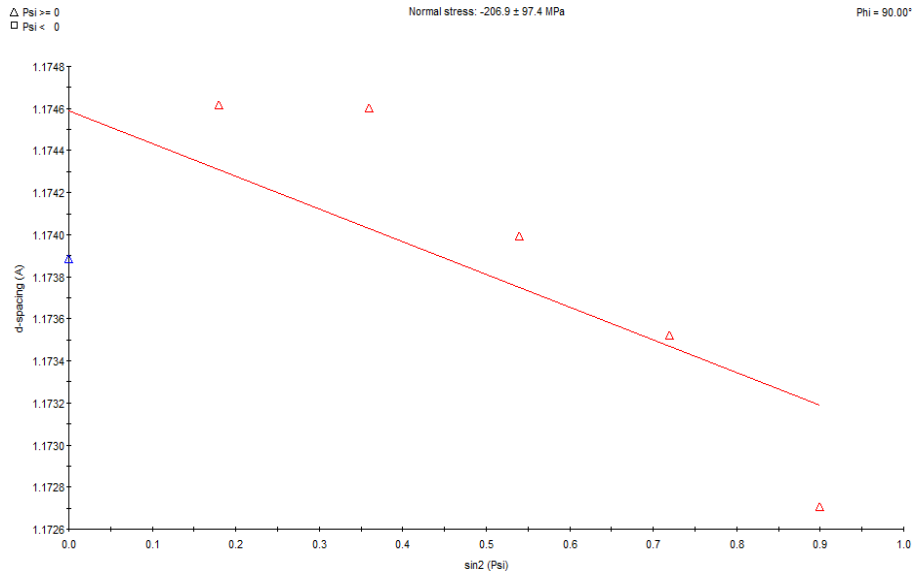
Rys. 110. Dyfraktogram zarejestrowany dla spiny próbki S690QL w stanie po spawaniu



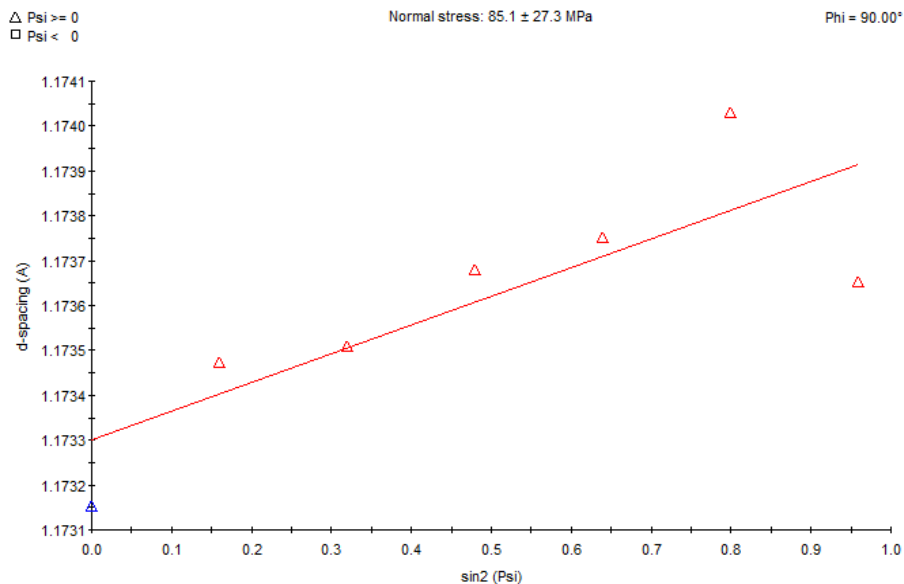
Rys. 111. Dyfraktogram zarejestrowany dla spiny próbki S690QL w stanie po spawaniu i przekuwaniu o wysokiej częstotliwości



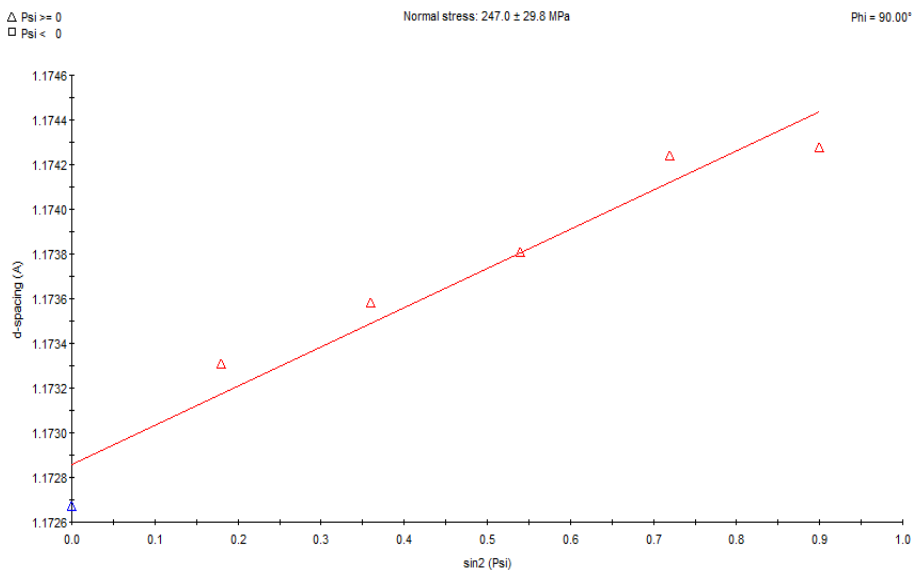
Rys. 112. Zmiany odległości międzypłaszczyznowej d refleksu (211) w funkcji $\sin^2\psi$, wyznaczona dla spoiny próbki S960M



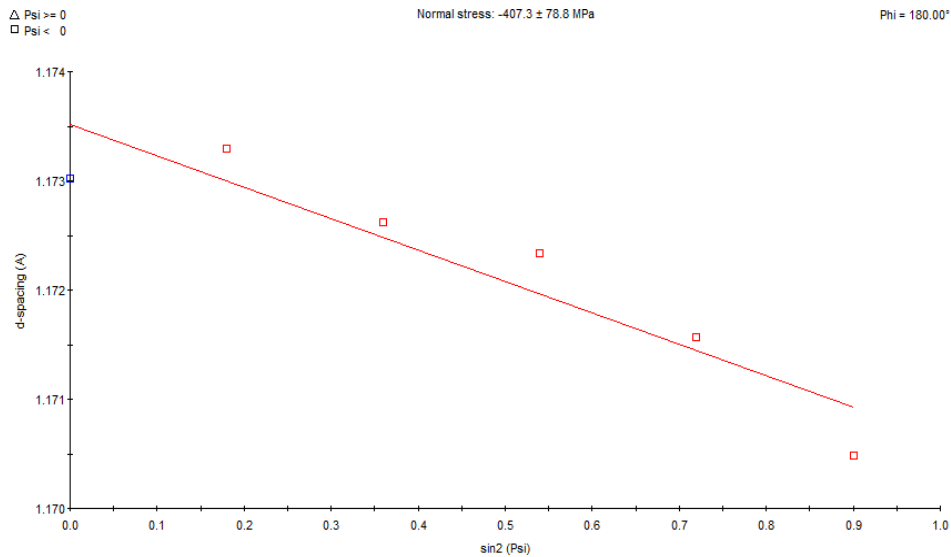
Rys.113. Zmiany odległości międzypłaszczyznowej d refleksu (211) w funkcji $\sin^2\psi$, wyznaczona dla spoiny próbki S960M



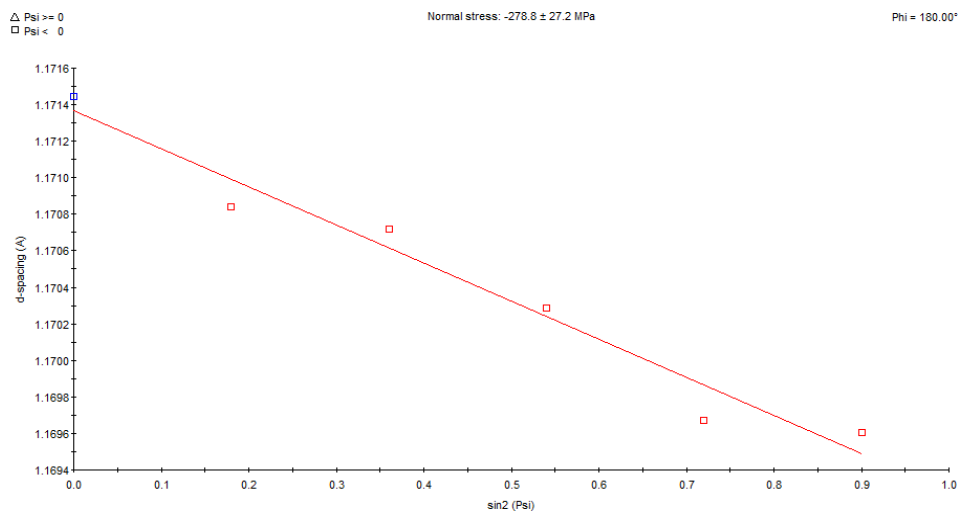
Rys. 114. Zmiany odległości międzyplaszczynowej d refleksu (211) w funkcji $\sin^2\psi$, wyznaczona dla spoiny próbki S960W



Rys. 115. Zmiany odległości międzyplaszczynowej d refleksu (211) w funkcji $\sin^2\psi$, wyznaczona dla spoiny próbki S960W



Rys. 116. Zmiany odległości międzypłaszczyznowej d refleksu (211) w funkcji $\sin^2\psi$, wyznaczona dla materiału rodzimego w pobliżu spoiny próbki S960M



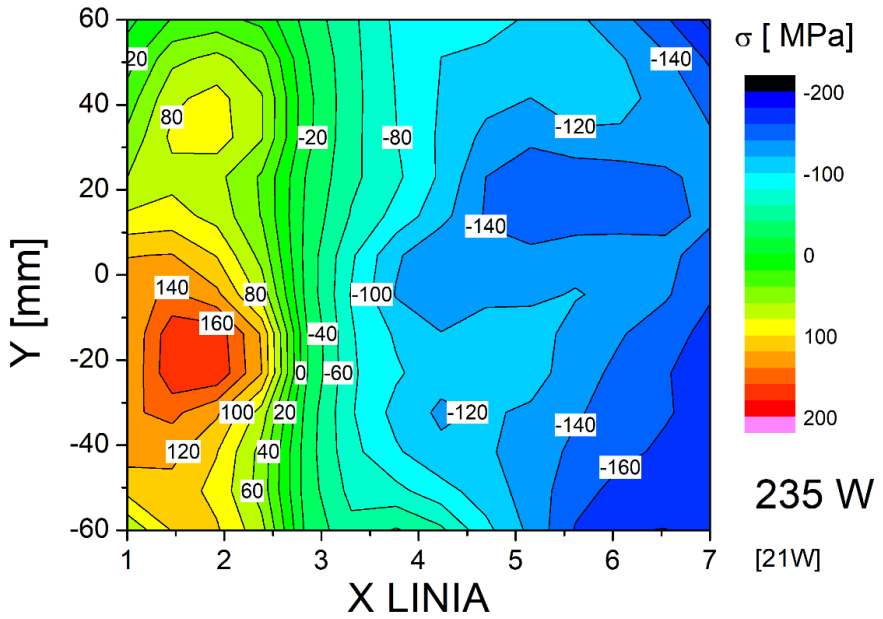
Rys. 117. Zmiany odległości międzypłaszczyznowej d refleksu (211) w funkcji $\sin^2\psi$, wyznaczona dla materiału rodzimego w pobliżu spoiny próbki S960M

5.4. Pomiar stanu naprężeń z wykorzystaniem efektu Barkhausena w złączach doczołowych

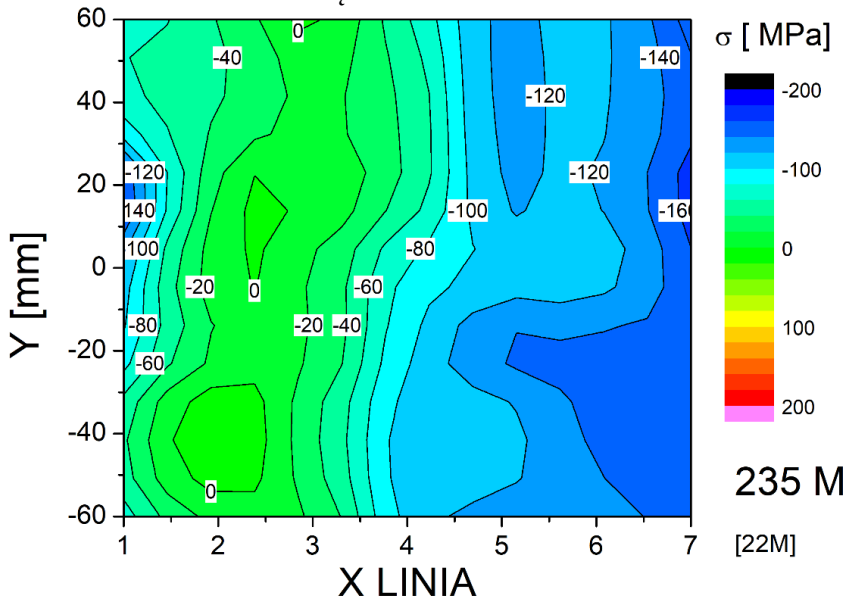
Poza analizą z wykorzystaniem XRD, przeprowadzono także pomiary naprężeń z wykorzystaniem efektu Barkhausena z wykorzystaniem aparatu MagStress5c. Uzyskane rezultaty naprężeń w zależności od warunków procesu oraz obszaru badania zestawiono w Tabeli 38 oraz przedstawiono dla poszczególnych typów próbek w postaci map 2D, (Rys. 118-132).

Tabela 38. Zestawienie średnich wartości naprężeń zmierzonych dla wszystkich złączy próbnych

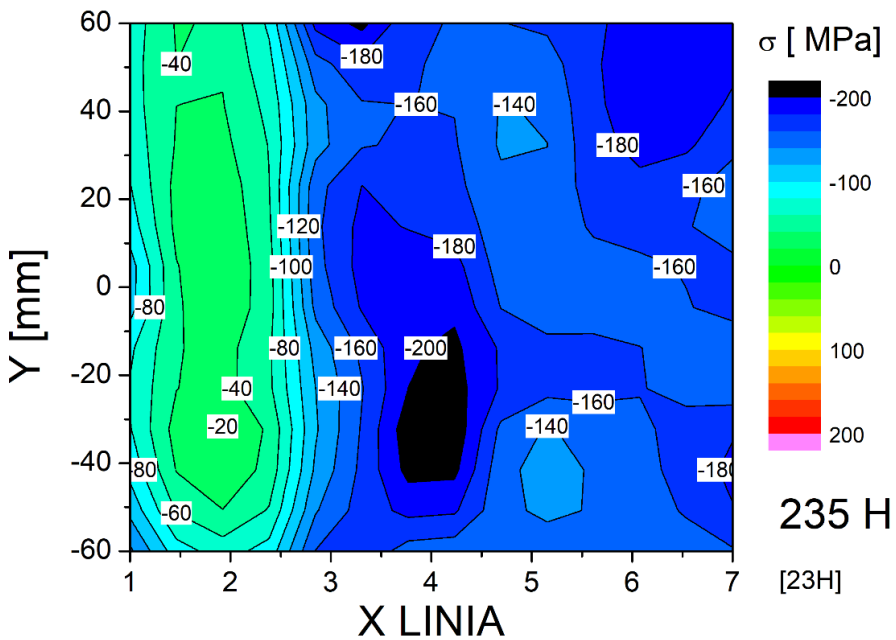
L.p.	Średnia wartość naprężenia [MPa]		
	Spoina	SWC	Materiał rodzimy
S235W	+75	+90	-65
S235M	-90	-20	-50
S235H	-95	-40	-170
S355W	+10	+80	-25
S355M	-110	-20	-10
S355H	-65	-55	-110
S460W	-60	+75	-50
S460M	-90	-5	-155
S460H	-120	-35	-30
S690W	-120	+70	-30
S690M	-100	+30	-75
S690H	-150	-40	-165
S960W	-170	+180	-40
S960M	-150	+30	-65
S960H	-170	-90	-140



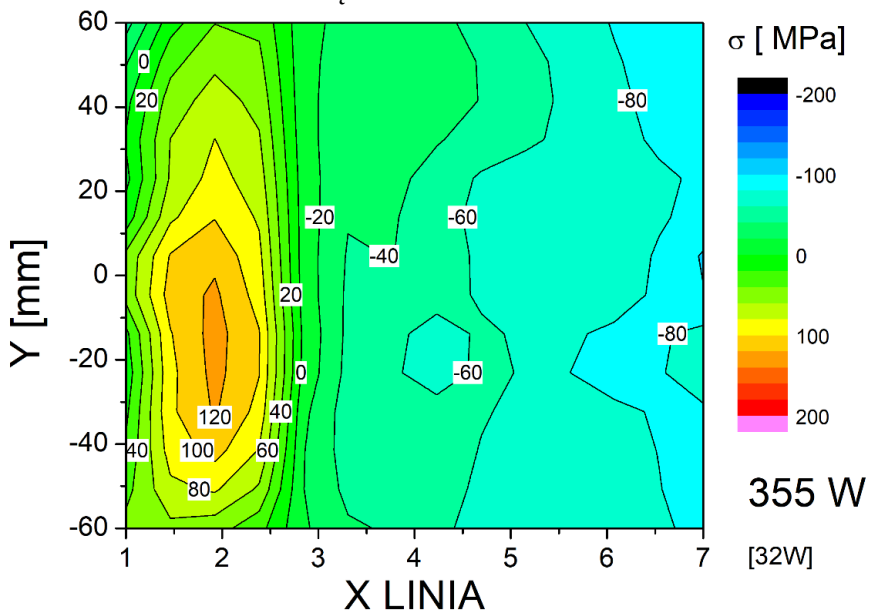
Rys. 118. Mapa rozkładu naprężenia w warstwie wierzchniej złącza S235W



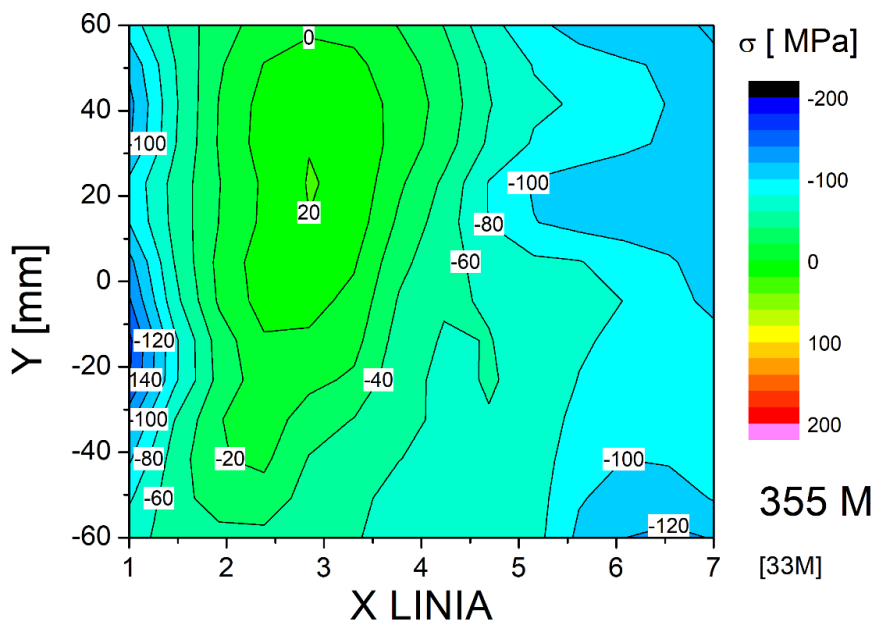
Rys. 119. Mapa rozkładu naprężenia w warstwie wierzchniej złącza S235M



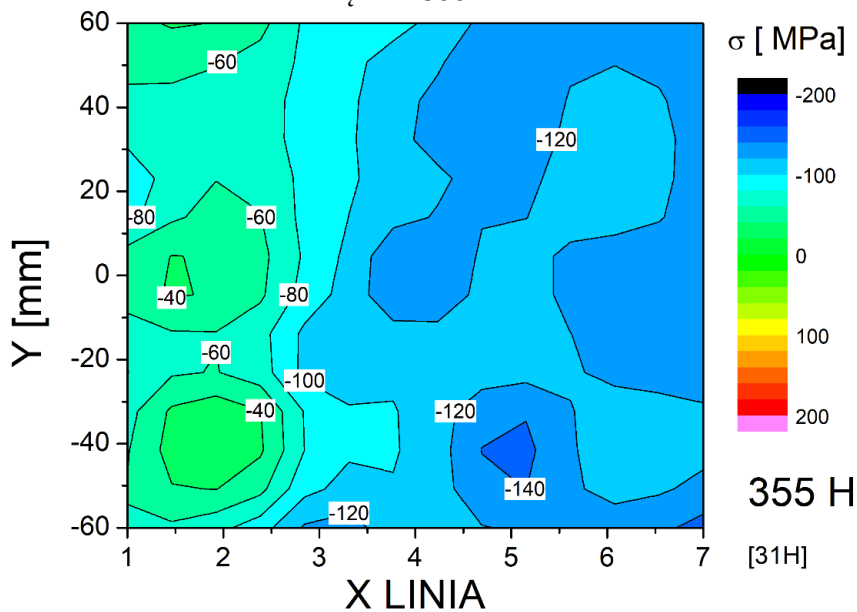
Rys. 120. Mapa rozkładu naprężenia w warstwie wierzchniej złącza S235H



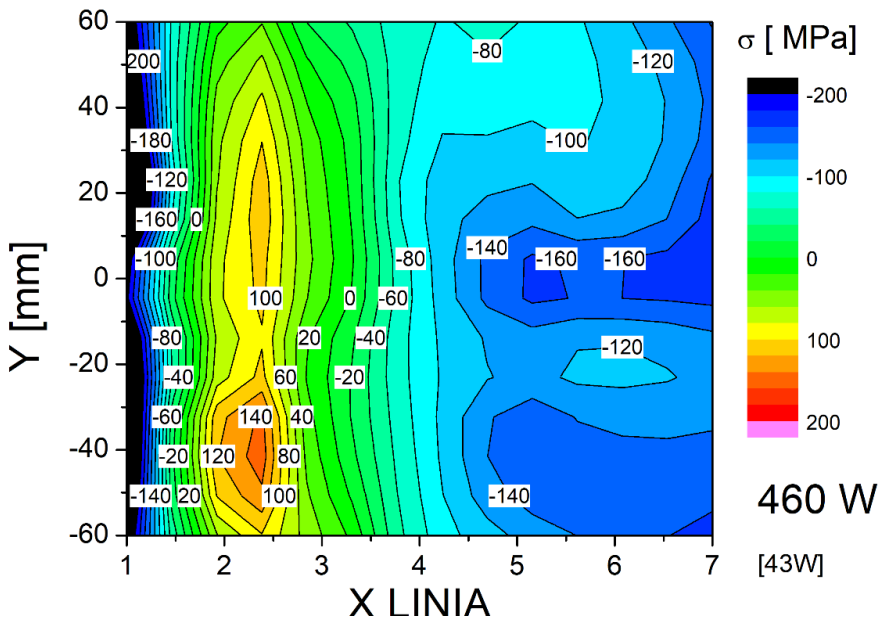
Rys. 121. Mapa rozkładu naprężenia w warstwie wierzchniej złącza S355W



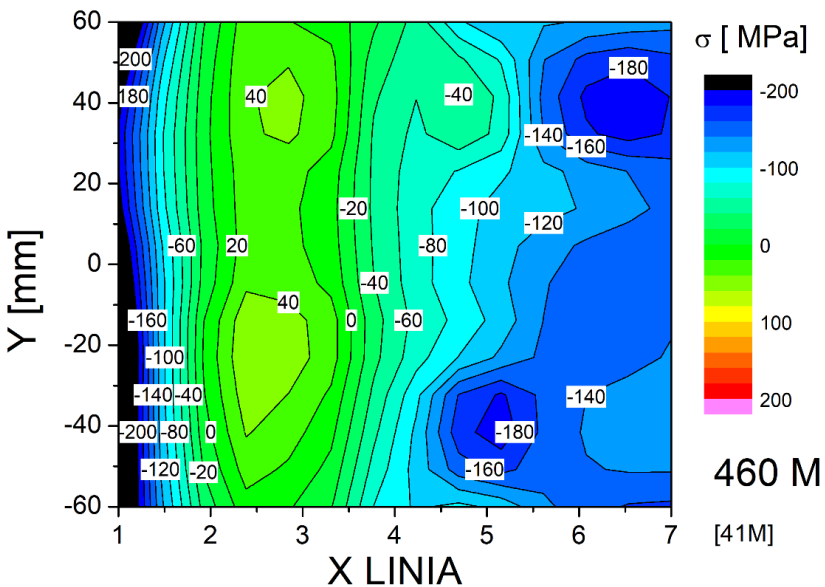
Rys. 122. Mapa rozkładu naprężenia w warstwie wierzchniej złącza S355M



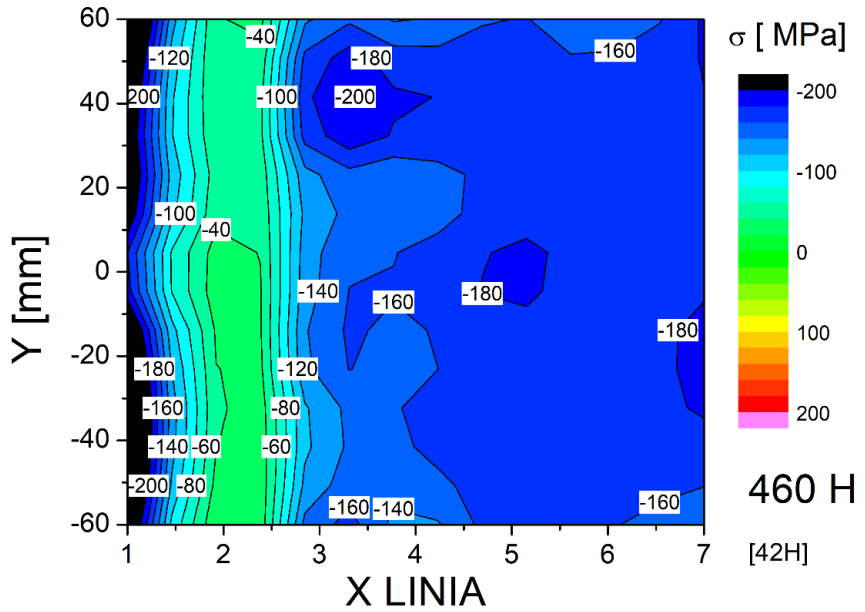
Rys. 123. Mapa rozkładu naprężenia w warstwie wierzchniej złącza S355H



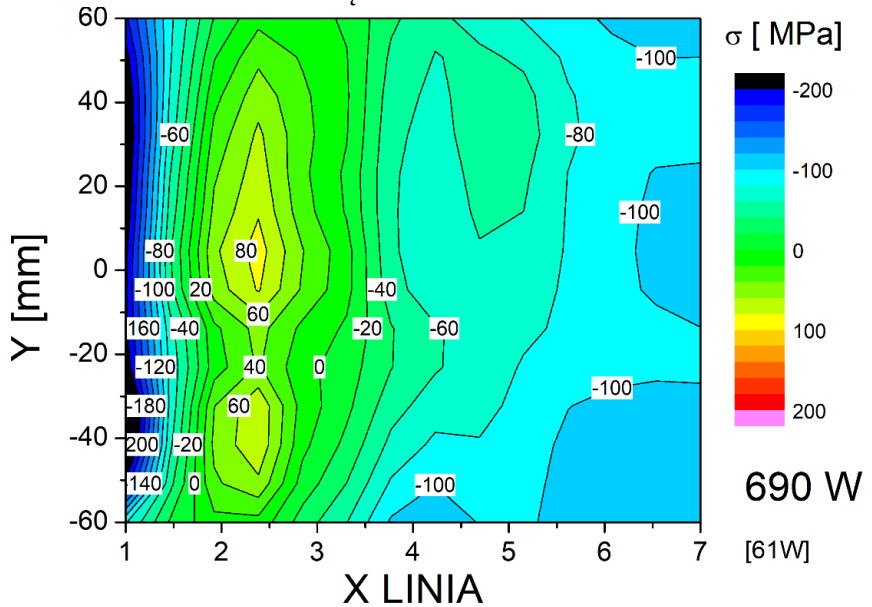
Rys. 124. Mapa rozkładu naprężenia w warstwie wierzchniej złącza S460W



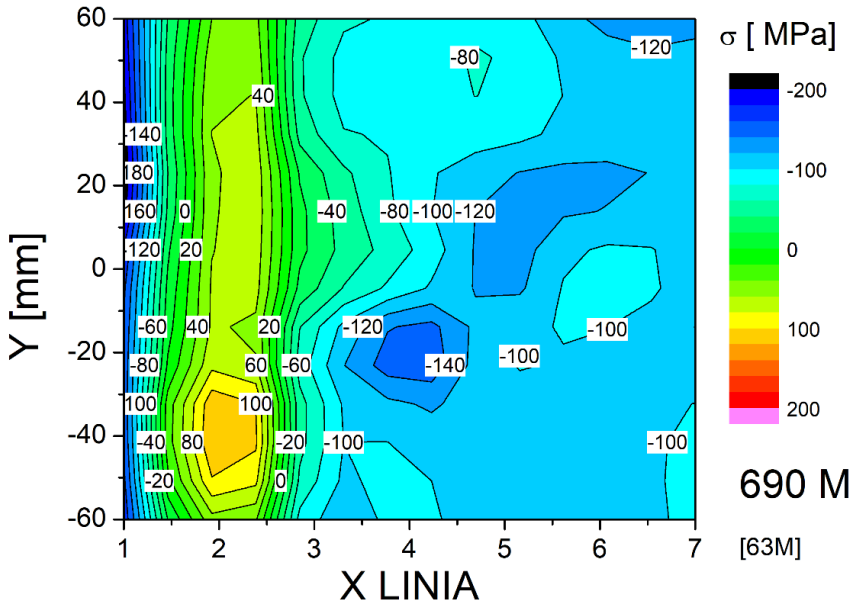
Rys. 125. Mapa rozkładu naprężenia w warstwie wierzchniej złącza S460M



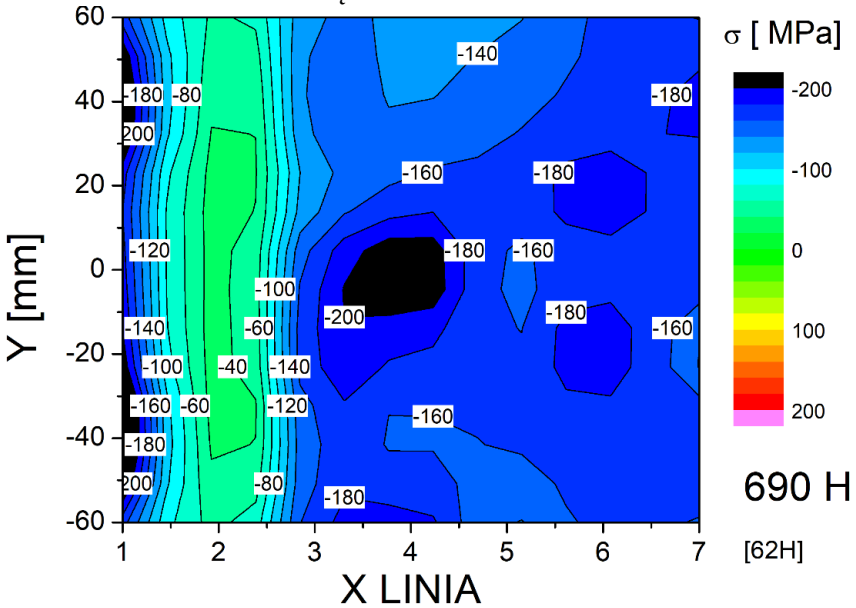
Rys. 126. Mapa rozkładu naprężenia w warstwie wierzchniej złącza S460H



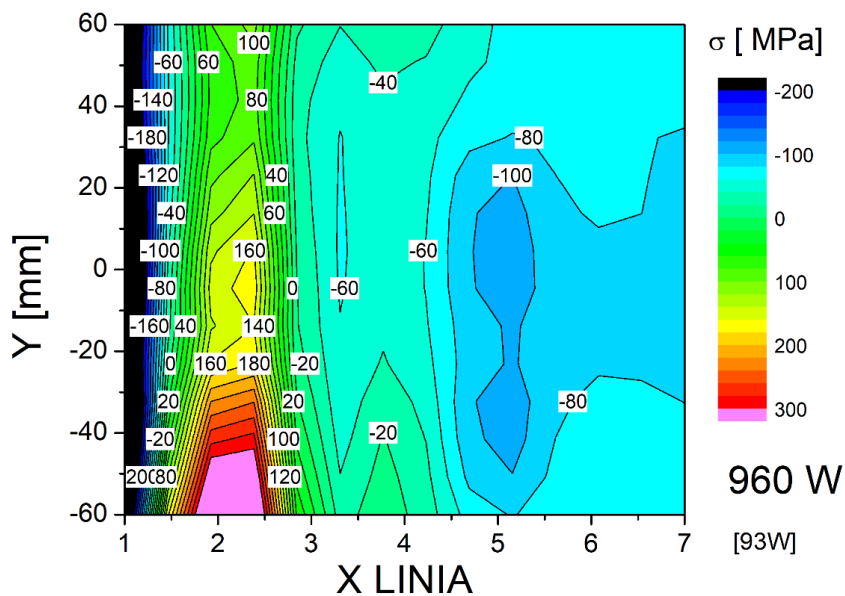
Rys. 127. Mapa rozkładu naprężenia w warstwie wierzchniej złącza S690W



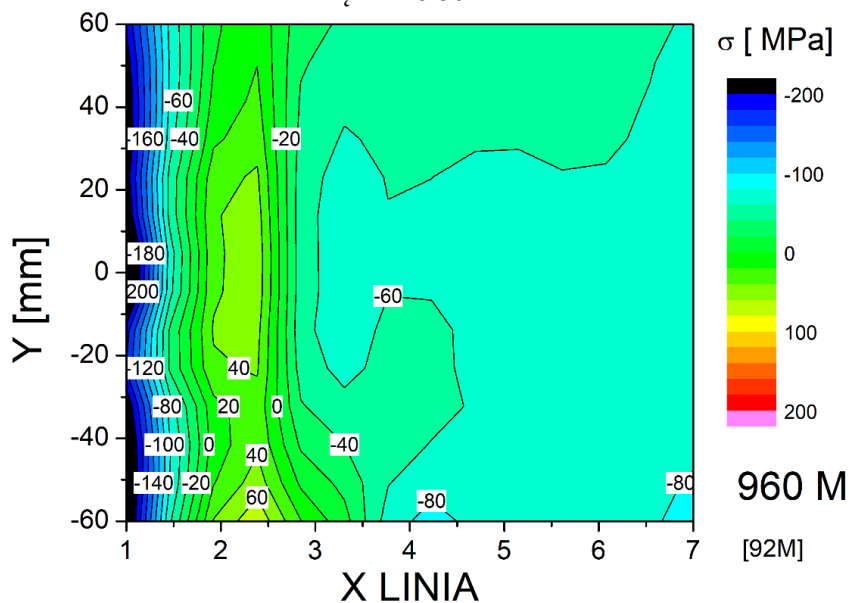
Rys. 128. Mapa rozkładu naprężenia w warstwie wierzchniej złącza S690M



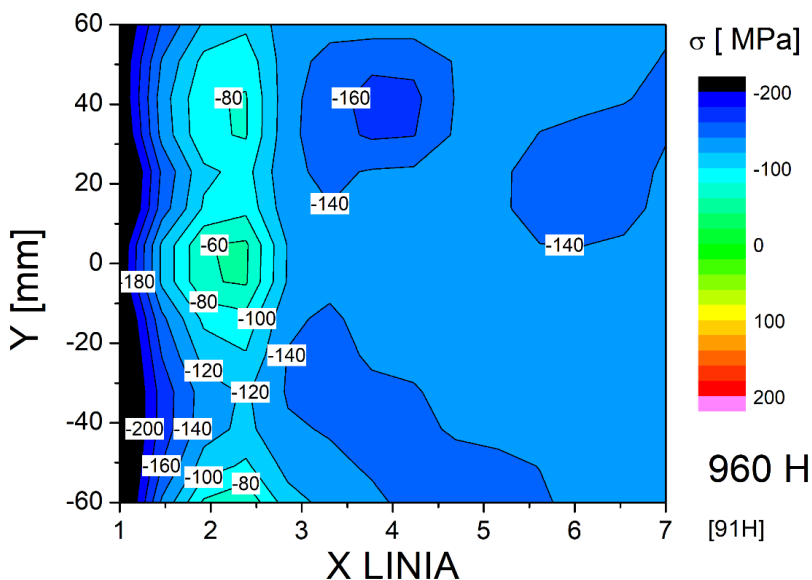
Rys. 129. Mapa rozkładu naprężenia w warstwie wierzchniej złącza S690H



Rys. 130. Mapa rozkładu naprężenia w warstwie wierzchniej złącza S960W



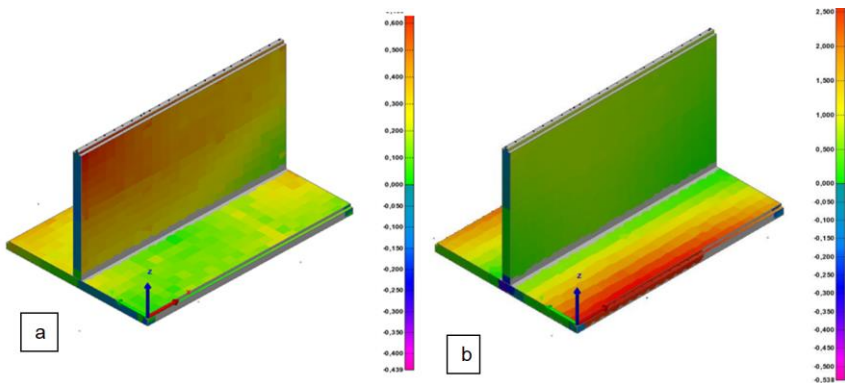
Rys. 131. Mapa rozkładu naprężenia w warstwie wierzchniej złącza S960M



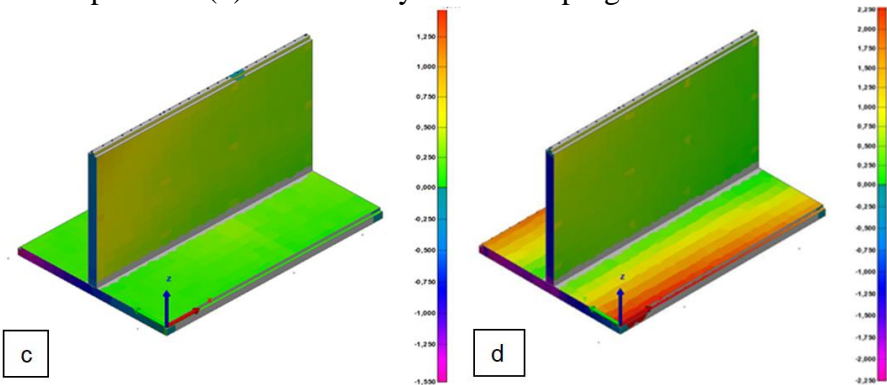
Rys. 132. Mapa rozkładu naprężenia w warstwie wierzchniej złącza S960H

5.5. Pomiary stanu odkształcenia złączy teowych z wykorzystaniem laser trackera

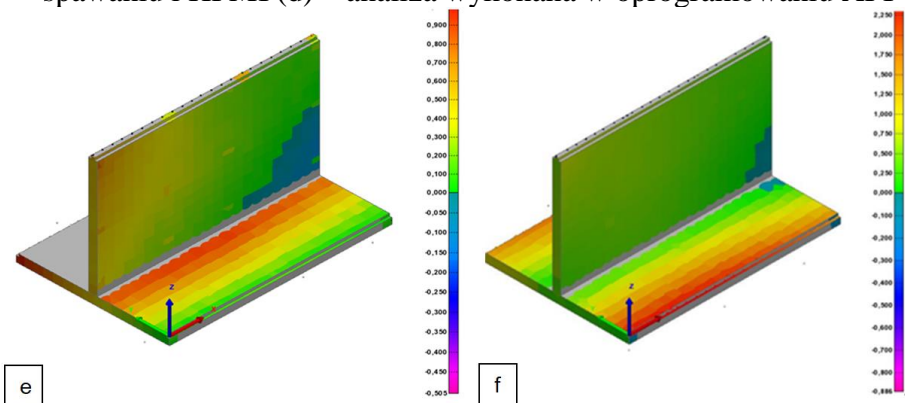
Wszystkie złącza próbne zostały poddane pomiarom przed spawaniem, po spawaniu oraz po zrealizowaniu procesów towarzyszących (PWHT czy HFMI). Dzięki zastosowaniu nowoczesnego oprogramowania do analizy pomiarów zrealizowanych przy wykorzystaniu laser trackera możliwe było utworzenie trójwymiarowego modelu złączy, które podobnie jak w przypadku MES pozwalają na łatwiejszą analizę wyników. Przykłady takich modeli przedstawione są na Rys. 133-135. Porównanie rzeczywistych wyników pomiarów, przedstawione zostało na Rys. 136-145. Zestawienie różnic w zakresie redukcji odkształcenia przedstawione zostało na Rys. 146.



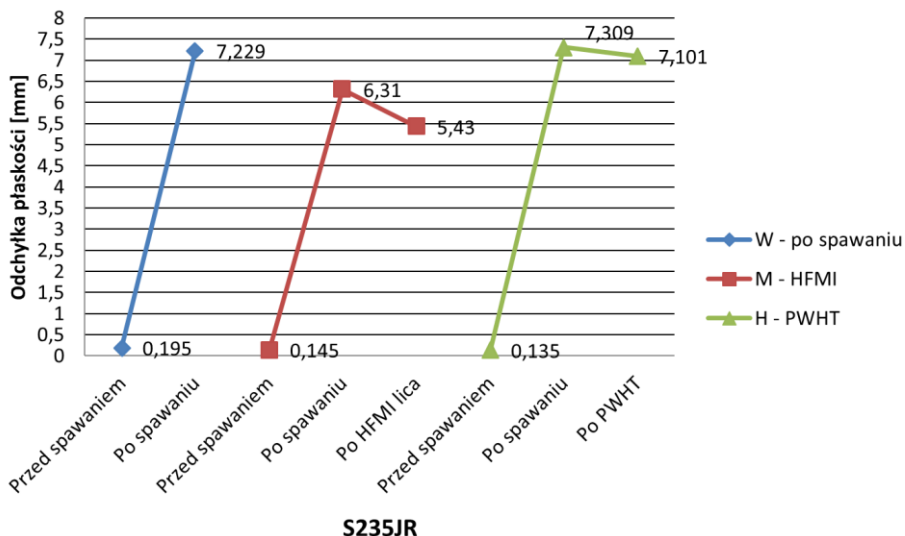
Rys. 133. Złącze próbne S690W przed spawaniem (a) oraz po spawaniu (b) – analiza wykonana w oprogramowaniu API



Rys. 134. Złącze próbne S690W przed spawaniem (c) oraz po spawaniu i HFMI (d) – analiza wykonana w oprogramowaniu API

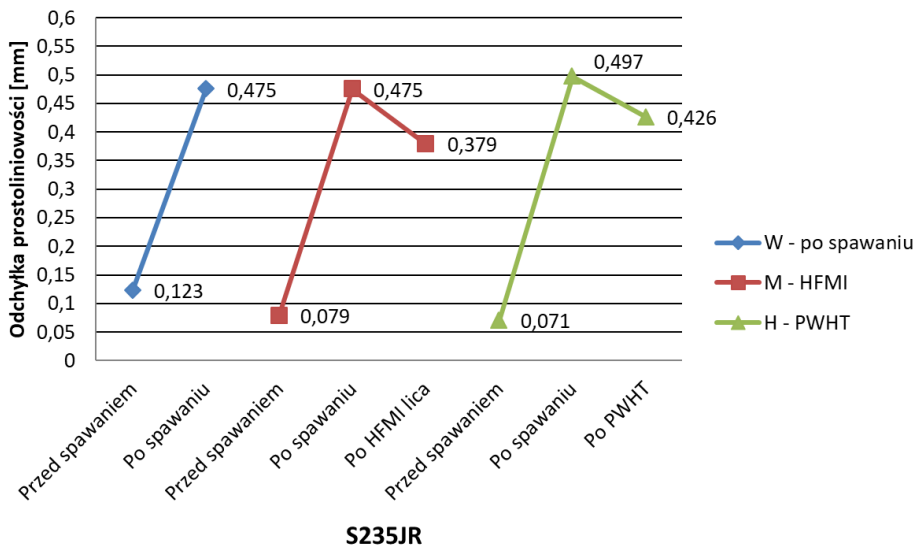


Rys. 135. Złącze próbne S690W przed spawaniem (e) oraz po spawaniu i PWHT (f)



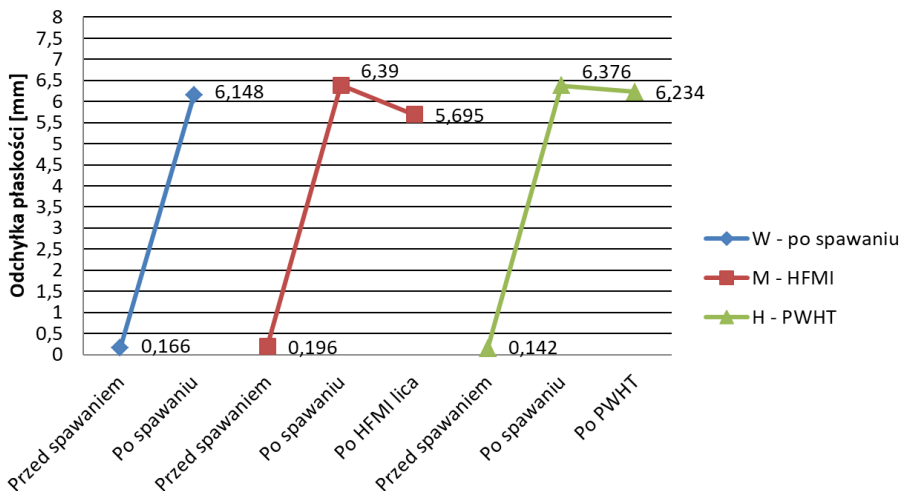
S235JR

Rys. 136. Zestawienie wyników pomiarów płaskości przyjętej z bazy powierzchni dolnej blachy złącza teowego



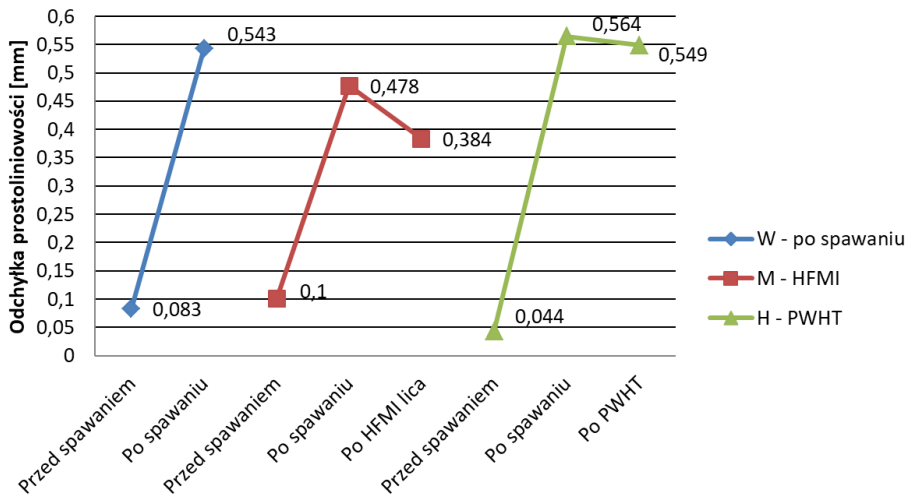
S235JR

Rys. 137. Zestawienie wyników prostoliniowości przyjętej z kształtu środka złącza teowego



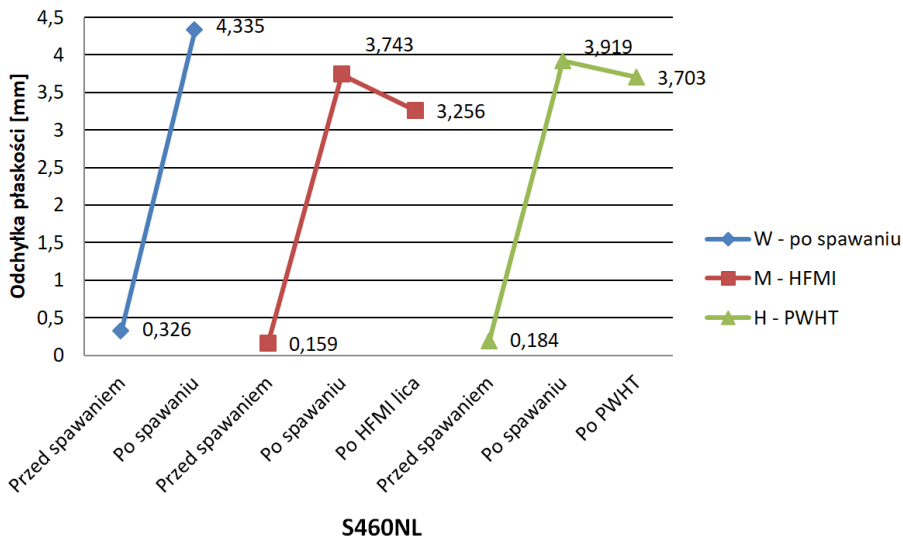
S355J2+N

Rys. 138. Zestawienie wyników pomiarów płaskości przyjętej z bazy powierzchni dolnej blachy złącza teowego

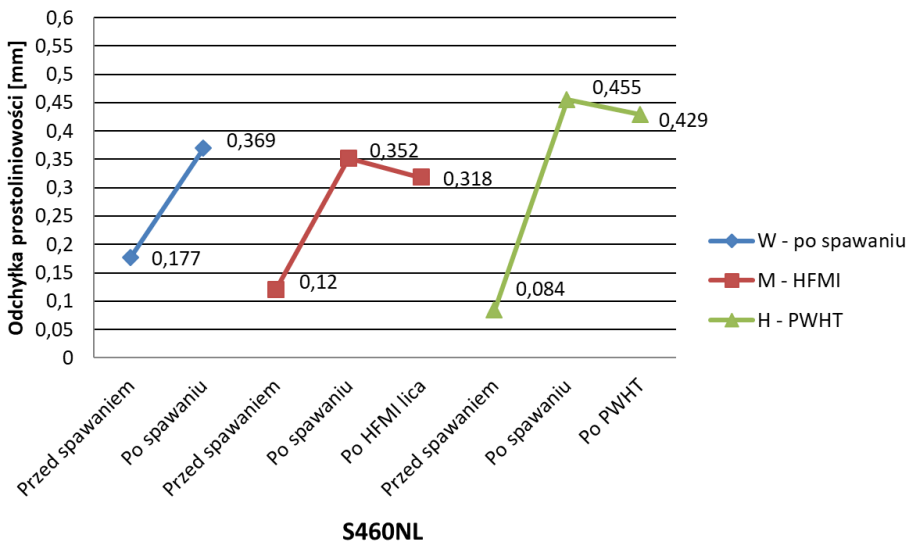


S355J2+N

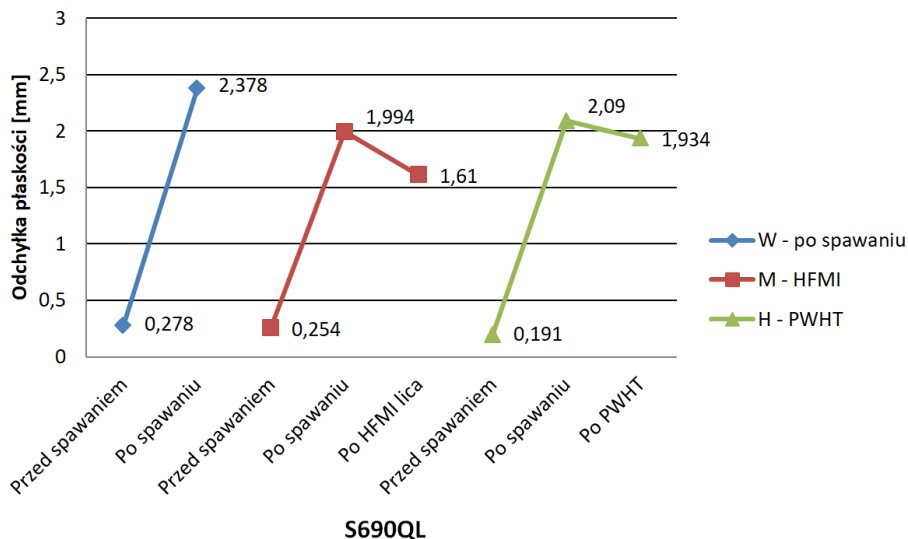
Rys. 139. Zestawienie wyników prostoliniowości przyjętej z kształtu średnika złącza teowego



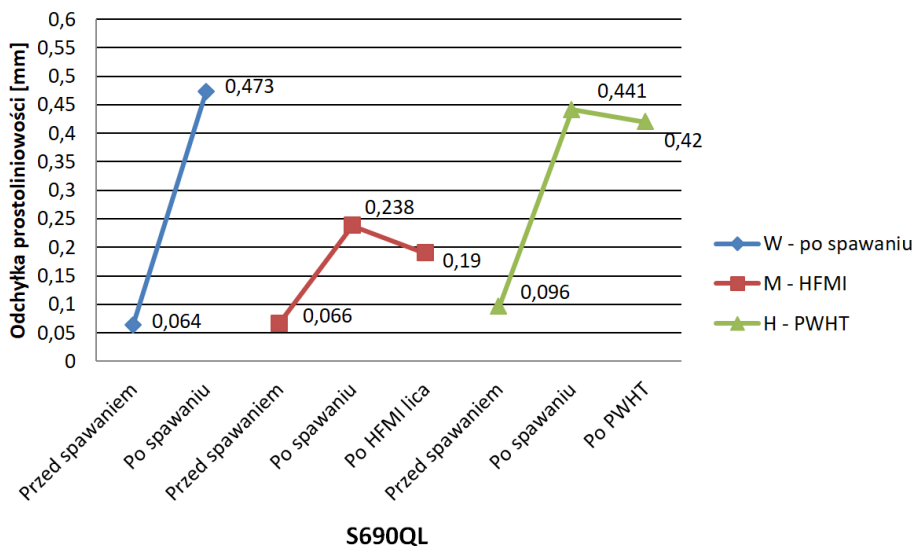
Rys. 140. Zestawienie wyników pomiarów płaskości przyjętej z bazy powierzchni dolnej blachy złącza teowego



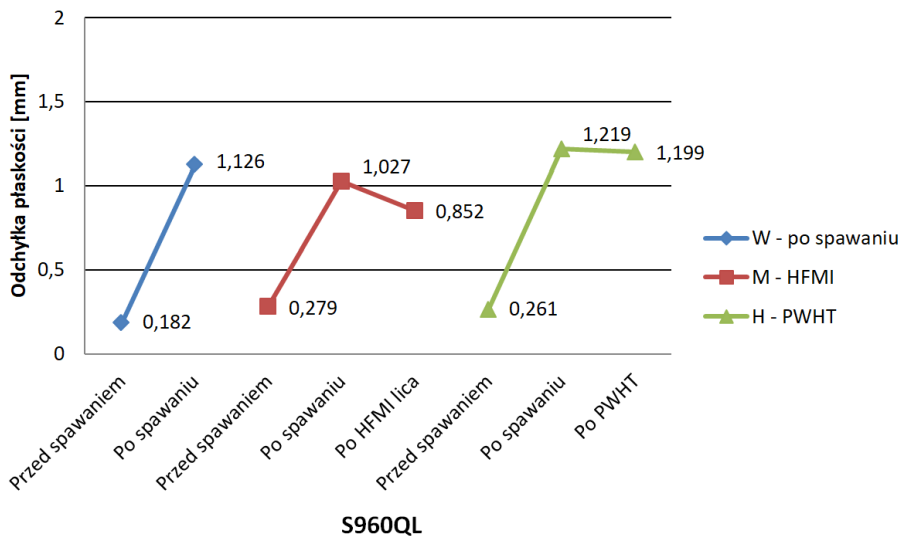
Rys. 141. Zestawienie wyników prostoliniowości przyjętej z kształtu środka złącza teowego



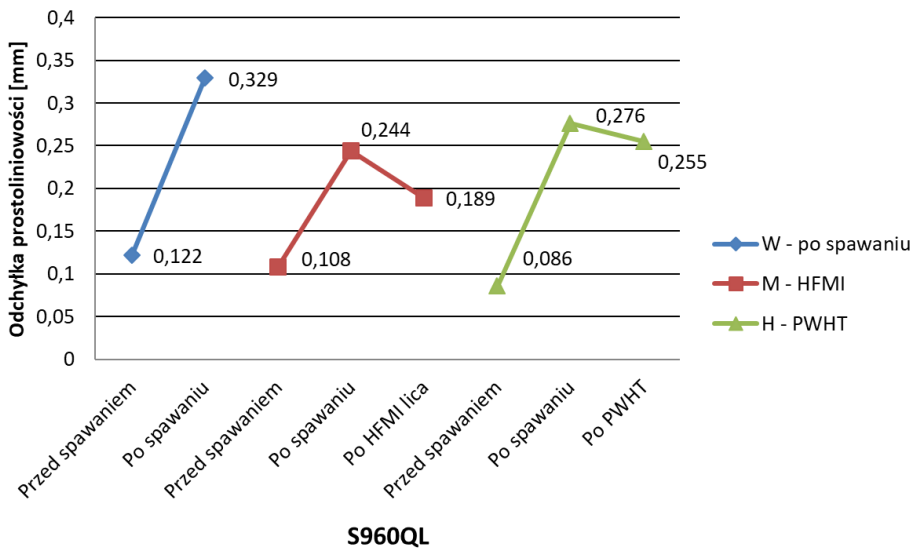
Rys. 142. Zestawienie wyników pomiarów płaskości przyjętej z bazy powierzchni dolnej blachy złącza teowego



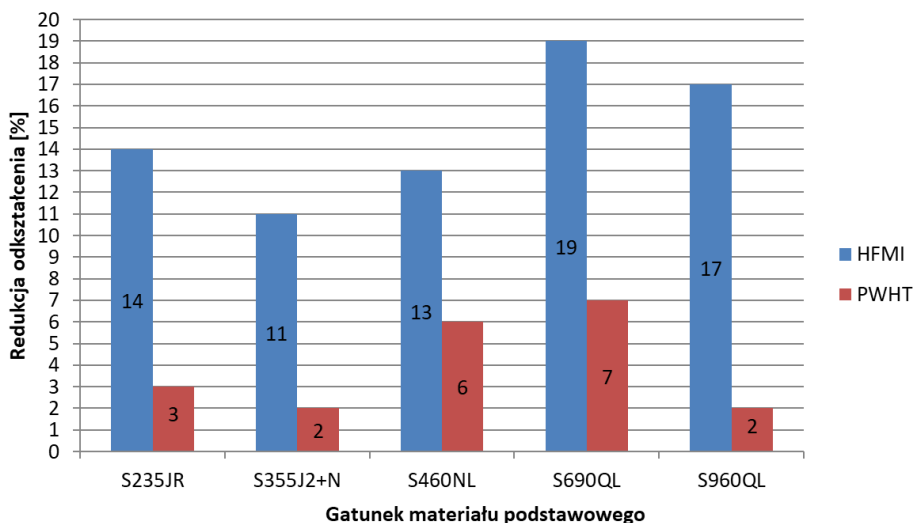
Rys. 143. Zestawienie wyników prostoliniowości przyjętej z kształtu środka złącza teowego



Rys. 144. Zestawienie wyników pomiarów płaskości przyjętej z bazy powierzchni dolnej blachy złącza teowego



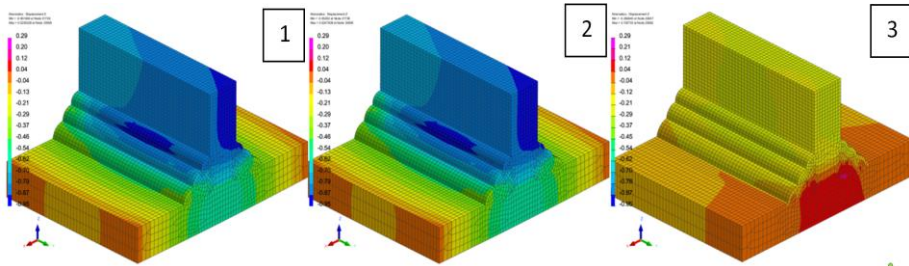
Rys. 145. Zestawienie wyników prostoliniowości przyjętej z kształtu środka złącza teowego



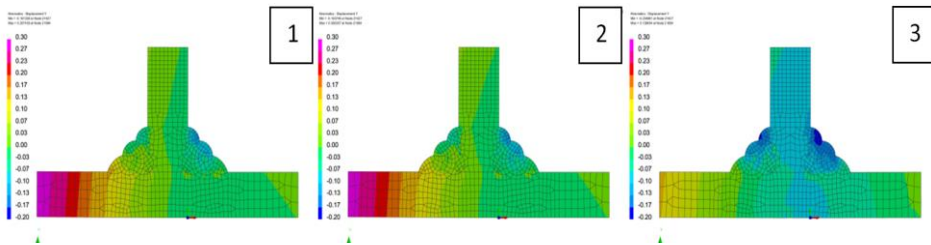
Rys. 146. Zestawienie redukcji odkształcenia w funkcji gatunku materiału podstawowego i zastosowanego procesu po i w trakcie spawania

5.6. Modelowanie i symulacja stanu odkształceń MES dla wybranych złączy spawanych

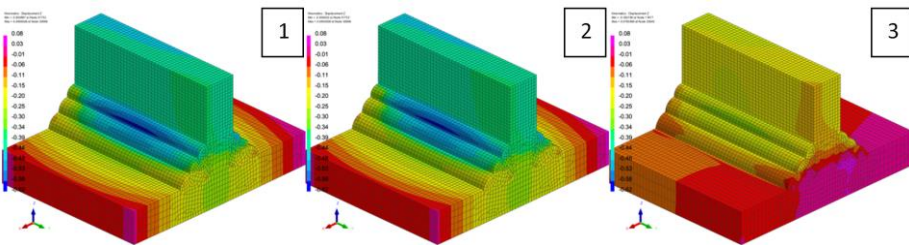
Dla wybranych złączy spawanych, zamodelowane zostały w programie Sysweld procesy spawalnicze wraz z procesami towarzyszącymi (HFMI oraz PWHT). Z dostępnych baz materiałowych wybrano stal S355J2+N oraz S460NL. Na Rys. 147-150, przedstawiono rozkłady odkształceń w osi normalnej do płaszczyzny dolnej blachy. Rozkład ten odniesiony został do tej osi ze względu na znacznie wyraźniejsze zmiany, które zaobserwowano podczas fizycznych pomiarów laser trakcerem podczas wykonywania próbek spawalniczych.



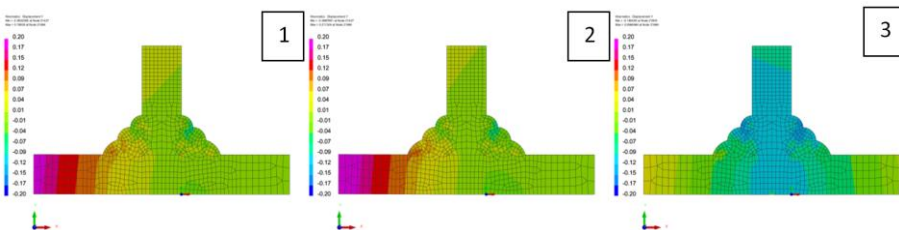
Rys. 147. Rozkład naprężeń dla próbki S355W (1), S355H (2), S355M (3)



Rys. 148. Rozkład naprężeń dla próbki S355W (1), S355H (2), S355M (3)



Rys. 149. Rozkład naprężeń dla próbki S460W (1), S460H (2), S460M (3)



Rys. 150. Rozkład naprężeń dla próbki S460W (1), S460H (2), S460M (3)

Wyniki zaprezentowane na Rys. 147 i 149 potwierdzają skuteczność w zakresie redukcji odkształceń poprzez przekuwanie o wysokiej częstotliwości. Graniczne odkształcenie wyrażone w postaci przemieszczenia względem stanu przed spawaniem w osi Z (czyli odkształcenie blachy podstawy) wyniosło dla próbki po spawaniu i PWHT (S355H) 72% więcej niż w przypadku próbki po spawaniu i HFMI (S355M). W przypadku różnicy w odkształceniu dla próbek z grupy S460NL różnica ta wyniosła 54%.

6. Podsumowanie i wnioski

Stale konstrukcyjne są i w najbliższej przyszłości będą dominującym materiałem wykorzystywanym do budowy elementów konstrukcyjnych dla wszystkich gałęzi energetyki. W związku z bardzo często występującą poza procesami spawania, precyzyjną obróbką mechaniczną i ryzykiem problemów z nią związanych, niezwykle istotnym okazuje się usystematyzowanie wiedzy i metodologii związanej z redukowaniem naprężeń i odkształceń spawalniczych w wymiarze zarówno lokalnym jak i globalnym.

W związku z powyższym powstała teza pracy, która zakłada, że istnieje możliwość sterowania naprężeniami i odkształceniami w złączach spawanych. Sterowanie to jest niezwykle istotne w przypadku interwencji naprawczych na już bardzo precyzyjnie obrobionych mechanicznie konstrukcjach gdzie klasyczna obróbka cieplna nie jest możliwa do zrealizowania.

Wszystkie próby spawania przeprowadzono w Grupie FAMET S.A. Zarówno założenie dotyczące przeprowadzenia spawania złączy doczołowych na stanowisku zrobotyzowanym jak i realizacja spawania złączy teowych przez spawacza pod ścisłym nadzorem, okazało się być (wnioskując po wynikach) kluczowym do osiągnięcia powtarzalności procesu, a przynajmniej takiego, który pozwolił na zaobserwowanie odpowiednich trendów w wynikach badań i pomiarów.

Parametry spawalnicze zarejestrowane dla poszczególnych ściegów na stanowisku zrobotyzowanym wszystkich 15 złączy próbnych, charakteryzowały się powtarzalnością $\pm 0,2$ kJ/mm w

odniesieniu do średnich zmierzonych wartości dla poszczególnych ściegów każdej grupy złączy spawanych reprezentowanych przez inny materiał podstawowy. Statystyki dotyczące parametrów spawalniczych zmierzonych dla częściowo zmechanizowanego spawania realizowanego przez spawacza na złączach teowych charakteryzowały się powtarzalnością $\pm 0,4$ kJ/mm.

W określonych i podanych w rozdziale 4.1 warunkach wykonywania statycznej próby rozciągania, wyniki dla próbek pobranych ze złączy poddanych procesowi HFMI były pozytywne w odniesieniu do normy na kwalifikowanie technologii spawania [6n]. W przypadku złącza o oznaczeniu S690H statyczna próba rozciągania zakończyła się wynikiem negatywnym, a było to najprawdopodobniej spowodowane parametrami wyżarzania odprężającego, które były zbliżone do temperatur związanych z ulepszeniem cieplnym tej stali powodując obniżenie własności wytrzymałościowych co także zostało potwierdzone w pracach [48, 54, 91, 99], że przy niekorzystnych warunkach pospawalniczej obróbki cieplnej stali o podwyższonej wytrzymałości R_m ulega obniżeniu.

W przypadku próby gięcia zgodnie z europejską normą [11n], wszystkie testy zakończyły się rezultatem pozytywnym w świetle wymagań. Należy zwrócić uwagę na próbki pobrane z płyty próbnej o oznaczeniu S460M gdzie obie próbki gięcia z rozciąganiem lica TFBB1 oraz TFBB2 posiadały nieciągłość w granicach dopuszczalnej wartości ale było to prawdopodobnie spowodowane utwardzeniem wynikającym z odkształcenia plastycznego przy HFMI.

Badanie udarnośći zakończyło się pozytywnie dla wszystkich próbek pobranych z pospawanych płyt. W przypadku próbek

poddanych procesowi HFMI dla płyt o oznaczeniu S460M, S690M oraz S960M, średnia wartość udarności była odpowiednio o 24,5%, 319% oraz 62% niższa od odpowiedniej grupy reprezentującej płyty po PWHT. Powodem tego stanu rzeczy jest wzrost twardości po HFMI powodujący gwałtowny spadek udarności.

Rozkłady twardości w obszarze pod licem spoin w odniesieniu do wartości wymaganych dla poszczególnych materiałów pozwalają na wniosek, że bez względu na to czy mamy do czynienia z HFMI czy PWHT złącza mogłyby zostać zakwalifikowane pozytywnie w zakresie kwalifikacji technologii spawania. Na uwagę zwracają wyniki rozkładów twardości dla próbek S235M, S355M, S460M, S690M oraz S960M, dla których wyraźnie widać istotny wzrost twardości w obszarze poddanym HFMI dla linii pomiarowej od strony lica spoiny. Na uwagę zasługują również zmierzone wartości twardości dla próbek S460M oraz S690M od strony grani, dla których widać istotny spadek wartości, który może być związany z redukcją naprężeń poprzez przekazywanie międzyścigowe, natomiast ten wniosek wymaga dodatkowych badań i szerszej grupy prób.

Zarówno makro jak i mikrostruktura złączy poddanych HFMI i PWHT jest pozbawiona nieakceptowalnych niezgodności. Obserwacja na mikroskopie świetlnym zwłaszcza dla próbek S690M oraz S960M pozwala na wniosek, że w porównaniu do S690H S690W oraz S960H i S960W, w obszarze SWC bezpośrednio pod powierzchnią zewnętrzną dochodzi do rozdrobnienia mikrostruktury co, jest najprawdopodobniej spowodowane intensywnym odkształceniem plastycznym podczas procesu HFMI i występujący przy tej okazji zgniot. Uzupełnieniem obserwacji mikrostruktury na mikroskopie

światłym była analiza EBSD, która dla wybranych próbek S960M (Rys. 103) oraz S960W (Rys. 102) potwierdziła różnice w wielkości ziaren w strefie bezpośrednio pod powierzchnią.

Analiza składu fazowego z wykorzystaniem dyfrakcji rentgenowskiej (dla próbek ze stali S690QL oraz S960QL) jak również analiza EBSD (jedynie dla próbek ze stali S960QL) wykazały, że w udziale objętościowym spoiny znajduje się od 2 do 4% austenitu Fe- γ . Jest to spowodowane podwyższoną zawartością niklu w drutach spawalniczych wykorzystanych do spawania tych próbek (dla IMT NiMoCr – 1,46% i 2,24% wagowo dla ED-FK1000).

Na podstawie uzyskanych wyników dotyczących stanu naprężenia stwierdzono, że w badanych próbkach zarówno w przypadku XRD jak i wykorzystania efektu Barkhausena, przekucie o wysokiej częstotliwości ma wpływ na redukcję naprężeń w stosunku do wyników naprężeń dla próbek w stanie po spawaniu. Efekt redukcji naprężeń w tym także zmiany naprężeń z rozciągających na ściskające można zaobserwować w obszarze SWC. W przypadku próbek w stanie po obróbce cieplnej wszystkie wyniki wskazują na znaczącą redukcję stanu naprężenia i to skuteczniej niż w przypadku HFMI. Zaobserwowano spójność różnic wyników przy porównaniu tendencji uzyskanych wartości i charakteru naprężeń przy pomiarze XRD oraz z wykorzystaniem efektu Barkhausena zarówno w obszarze lica spoiny jak i w obszarze SWC.

Analiza stanu odkształceń w zależności od zastosowanej konfiguracji spawania i procesów towarzyszących wyraźnie pokazuje na przewagę zastosowania technologii międzyścięgnowego HFMI nad PWHT w kontekście redukcji odkształceń w trakcie i po spawaniu. Co

warte uwagi, dla stali w stanie ulepszonym cieplnie zastosowanie PWHT jest związane z ograniczeniami ze względu na temperaturę wysokiego odpuszczania. Tu technologia HFMI nie ma ograniczeń w przypadku zastosowania zwłaszcza w obliczu pozostałych wyników badań.

Wnioski naukowe

Odnosząc się do celów naukowych pracy, sformułowano następujące wnioski dotyczące technologii HFMI:

1. Zastosowana technologia przekuwania o wysokiej częstotliwości wpływa na strukturę i właściwości mechaniczne złączy spawanych szerokiej grupy stali konstrukcyjnych. Technologia przekuwania wykazuje pozytywny wpływ na własności wytrzymałościowe, przy niewielkim obniżeniu własności plastycznych w porównaniu do złączy poddanych obróbce cieplnej po spawaniu.
2. Zastosowana technologia przekuwania o wysokiej częstotliwości obniża stan naprężeń złączy spawanych w porównaniu do złączy bez dodatkowej obróbki. Jak wykazano nie jest to jednak metoda tak skuteczna w odniesieniu do wyżarzania odpężającego.
3. Technologia przekuwania o wysokiej częstotliwości oddziałuje na stan odkształceń spawalniczych w teowych złączach spawanych powodując redukcję deformacji. Jak wykazano w obszarze redukcji

odkształceń technologia HFMI ma znacznie większą skuteczność niż wyżarzanie odprężające.

Wnioski technologiczne (użytkowe)

Odnosząc się do celów technologicznych pracy, sformułowano następujące wnioski dotyczące technologii HFMI:

1. Optymalna częstotliwość procesu HFMI została ustalona na poziomie 90 Hz. Prędkość procesu zależy w dużej mierze od granicy plastyczności oraz twardości materiału i wynosi odpowiednio 30 cm/min dla stali S235JR, S355J2+N oraz S460NL i 20 cm/min dla stali S690QL oraz S960QL. W przypadku trudno dostępnej przestrzeni w trakcie i po spawaniu najlepiej sprawdza się trzpień o promieniu wierzchołka $R=1,5\text{mm}$, natomiast do obróbki wydajnej w łatwo dostępnych miejscach należy stosować promień wierzchołka $R=2,0\text{mm}$.
2. Proces HFMI, zastosowany w trakcie procedury kwalifikowania technologii spawania nie wpływa istotnie na własności wytrzymałościowe załącza spawanego. Przeprowadzone badania i pomiary oraz ich rezultaty świadczą o możliwości kwalifikowania technologii spawania z zastosowaniem procesu HFMI. Ponadto proces przekuwania o wysokiej częstotliwości w sposób istotny wpływa na obniżenie stanu naprężeń oraz odkształceń.
3. Na podstawie wyników zaprezentowanych w pracy, została zakwalifikowana technologia spawania z

wykorzystaniem HFMI, która już w trakcie trwania przewodu doktorskiego umożliwiła dzięki przedstawieniu wyników, na walidację czy też akceptację przez Klientów FAMET S.A. wdrożenia tego procesu (Rys. 151 i 152) jako metody redukcji odkształceń zwłaszcza podczas napraw na już bardzo precyzyjnie obrobionych odpowiedzialnych konstrukcjach dla energetyki.

Kierunki dalszych badań

Odnosząc się do wyników tej pracy wyznaczono następujące kierunki dalszych badań:

1. Wykonać dodatkowe badania w zakresie wpływu przekuwania o wysokiej częstotliwości złączy spawanych jednostronnie na rozkład twardości w warstwie grani, a zwłaszcza zbadać mechanizmy powodujące redukcję twardości w tym obszarze.
2. Weryfikacja oddziaływania zastosowania procesu HFMI na złącza spawane poddane naprawie po procesie wyżarzania odprężającego na stan naprężeń i odkształceń pospawalniczych.

PROTOKÓŁ KWALIFIKOWANIA TECHNOLOGII SPAWANIA
WELDING PROCEDURE QUALIFICATION RECORDS

WPQR nr 84/F/2024

Wytwórca: Zakład Produkcyjny nr 1 w Kędzierzynie-Koźlu
Manufacturer:
Adres: 47-225 Kędzierzyn-Koźle, Szkolna 15A
Address:
Instrukcja technologiczna spawania pWPS nr: 0101.C.1.001.HFMI rew. 0
Welding Procedure Specification pWPS No.:
Przepisy/Norma dotycząca badań: EN ISO 15614-1:2017
Code/Testing Standard:
Data spawania: 09-10.11.2021
Date of welding:

ZAKRES UZNANIA:

RANGE OF APPROVAL:

Metoda(y) spawania: 135 [MAG/GMAW]
Welding process (es):
Rodzaj złącza i spoiny: Złącze doczołowe (podwójne 1/2V) / spoina czołowa BW nb ss ml
Type of joint and weld:
Grupa(y) materiału(ów) podstawowego(ych) i podgrupa(y): 1.1 (S235JR) / 1.2 (S355J2+N) / 1.3 (S460NL)
Parent material group(s) and sub group(s):
Grubość materiału podstawowego (mm): t₁=10 mm / t₂=10 mm
Parent Material Thickness (mm):
Grubość spoiny (mm): 3 - 20 mm
Weld Metal Thickness (mm):
Grubość spoiny pachwinowej(mm): -
Throat Thickness (mm):
Jednościęgowe / wielościęgowe: Wielościęgowe
Single run / Multi run:
Oznaczenie spoiwa: EN ISO 14341-A: G 46 4 M20 3Si1
Filler Material Designation:
Marka spoiwa: IMT 2; Multimet
Filler Material Make:
Wymiar spoiwa: Ø1,2 mm
Filler Material Size:
Oznaczenie gazu osłonowego / Topnika: ISO 14175 – M20 – ArC – 8
Designation of Shelling Gas/Flux:
Oznaczenie gazu formującego: -
Designation of Backing Gas:
Rodzaj prądu spawania: DC/+
Type of Welding Current and Polarity:
Sposób przenoszenia metalu: Natryskowy
Mode of Metal Transfer:
Ilość wprowadzonego ciepła: 8,2 + 15,1 kJ/cm
Heat Input:
Pozycje spawania: PA
Welding positions:
Temperatura podgrzewania wstępnego: 10°C
Preheat temperature:
Temperatura międzysięgowa: 130°C
Interpass Temperature:
Obróbka cieplna po spawaniu: -
Post-Weld Heat-Treatment:
Inne informacje : Ręczne przekuwanie międzysięgowe o wysokiej częstotliwości – 90 Hz
Other Information : wraz z przekuwaniem lica i SWC – High Frequency Mechanical Impact
Urządzenie Weld Line 10 PITEC
Parametry: Promień wierzchołka trzpienia R = 1,5 (linia wtopienia i linia między ściegami)
R = 2,0-2,5mm (obróbka pozostałej powierzchni spoin)
Prędkość przekuwania: 30 cm/min

Niniejszym stwierdzam się, że ww. złącze próbne spawano i zbadano zgodnie z wymaganiami wyżej wymienionych warunków technicznych i norm i uzyskano wynik pozytywny.
Certified that test welds prepared, welded and tested satisfactorily in accordance with the requirements of the code/testing standard indicated above.

GŁÓWNY SPAWALNIK

mgr inż. Andrzej Chudziło (EWE)

Nazwisko i imię eksperta, podpis:
Examiner or examining body, name and signature:

Kędzierzyn-Koźle

05.02.2024

Lokalizacja/ Location:

Data wydania/ Date of issue:

Rys.151. Zakwalifikowana technologia spawania z przekuwaniem spoiny o wysokiej częstotliwości dla stali z grup 1.1, 1.2 oraz 1.3

PROTOKÓŁ KWALIFIKOWANIA TECHNOLOGII SPAWANIA
WELDING PROCEDURE QUALIFICATION RECORDS

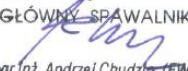
WPQR nr 85/F/2024

Wytwórca: Manufacturer:	Zakład Produkcyjny nr 1 w Kędzierzynie-Koźlu
Adres: Address:	47-225 Kędzierzyn-Koźle, Szkolna 15A
Instrukcja technologiczna spawania pWPS nr: Welding Procedure Specification pWPS No.:	0303.C.1.001.HFMI rew. 0
Przepisy/Norma dotycząca badań: Code/Testing Standard:	EN ISO 15614-1:2017
Data spawania: Date of welding:	09-10.11.2021
ZAKRES UZNANIA: RANGE OF APPROVAL:	
Metoda(y) spawania: Welding process (es):	135 [MAG/GMAW]
Rodzaj złącza i spoiny: Type of joint and weld:	Złącze doczołowe (podwójne 1/2V) / spoina czołowa BW nb ss ml Built joint (double 1/2V) / built weld
Grupa(y) materiału(ów) podstawowego(ych) i podgrupa(y): Parent material group(s) and sub group(s):	3.1 (S690QL) / 3.2 (S960QL)
Grubość materiału podstawowego (mm): Parent Material Thickness (mm):	t = 10 mm
Grubość spoiny (mm): Weld Metal Thickness (mm):	3 - 20 mm
Grubość spoiny pachwinowej(mm): Throat Thickness (mm):	-
Jednościgowe / wielościgowe: Single run / Multi run:	Wielościgowe Multi-layer
Oznaczenie spoiwa: Filler Material Designation:	EN ISO 16834-A: G 69 4 M20 Mn3Ni1CrMo (IMT NiMoCr) EN ISO 16834-A: G 89 6 M20 Mn4Ni2CrMo (ED-FK 1000)
Marka spoiwa: Filler Material Make:	IMT NiMoCr; Multimet (dla S690QL) ED-FK1000; Fliess (dla S960QL)
Wymiar spoiwa: Filler Material Size:	Ø1,2 mm
Oznaczenie gazu osłonowego / Topnika: Designation of Shelling Gas/Flux:	ISO 14175 – M20 – ArC – 8
Oznaczenie gazu formującego: Designation of Backing Gas:	-
Rodzaj prądu spawania: Type of Welding Current and Polarity:	DC/+
Sposób przeniesienia metalu: Mode of Metal Transfer:	Natryskowy Spray
Ilość wprowadzonego ciepła: Heat Input:	8,2 ÷ 15,1 kJ/cm
Pozycje spawania: Welding positions:	PA
Temperatura podgrzewania wstępnego: Preheat temperature:	10°C
Temperatura międzycięgowa: Interpass Temperature:	130°C
Obróbka cieplna po spawaniu: Post-Weld Heat-Treatment:	-
Inne informacje: Other Information :	Ręczne przekuwanie międzycięgowe o wysokiej częstotliwości – 90 Hz wraz z przekuwaniem lica i SWC – High Frequency Mechanical Impact Urządzenie Weld Line 10 PITEC Parametry: Promień wierzchołka trzpienia R = 1,5 (linia wtopienia i linia między ściegami) R = 2,0-2,5mm (obróbka pozostałej powierzchni spoin) Prędkość przekuwania: 20 cm/min

Niniejszym stwierdza się, że ww. złącze próbne spawano i zbadano zgodnie z wymaganiami wyżej wymienionych warunków technicznych i norm i uzyskano wynik pozytywny.

Certified that test welds prepared, welded and tested satisfactorily in accordance with the requirements of the code/testing standard indicated above.

Kędzierzyn-Koźle 05.02.2024
Lokalizacja/ Location: Data wydania/ Date of issue:

GŁÓWNY SPAWALNIK

mgr Inż. Andrzej Chudzo (EWE)
Nazwisko i imię eksperta, podpis:
Examiner or examining body, name and signature:

Rys. 152. Zakwalifikowana technologia spawania z przekuwaniem spoiny o wysokiej częstotliwości dla stali z grup 3.1 oraz 3.2

LITERATURA

- [1] P. J. Haagenzen, S. J. Maddox: *IIW Recommendations on methods for improving the fatigue strength of welded joints*, IIW-2142-10, 2013, ISBN 978-1-78242-065-1. pp 21-29.
- [2] Ernould, Clément & Schubnell, Jan & Farajian, Majid. (2017). *Numerical Simulation of Pin Kinetic and its Influence on the Material Hardening, Residual Stress Field and Topography during High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treatment*. pp 20-2.2
- [3] D. Simunek, M. Leitner, M. Stoschka. *Numerical simulation loop to investigate the local fatigue behaviour of welded and HFMI-treated joints*. s.l. : International Institute of Welding, 2013. XIII-WG2-136-13 pp. 6-13.
- [4] Sędek P. *Problemy naprężeń i odkształceń spawalniczych*, Inżyniera Materiałowa, Biuro Gamma, Warszawa 2000, ISBN 83-87848-20-4.
- [5] Łukomski A. *Skurcze i inne odkształcenia spawalnicze*, Projektowanie i konstrukcje inżynierskie 2014, ISSN 1899-699X.
- [6] Colegrove, P., Ikeagu, C., Thistlethwaite, A., Williams, S., Nagy, T., Suder, W., Pirling, T. (2009). *Welding process impact on residual stress and distortion*. Science and Technology of Welding and Joining, 14(8), pp 717–725.
- [7] Michaleris P., *1 - Introduction to welding residual stress and distortion*, Editor(s): Pan Michaleris, In Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, Minimization of Welding Distortion and Buckling, Woodhead Publishing, 2011, pp 3-22, ISBN 9781845696627.

- [8] Conrardy, C., Huang, T.D., Harwig, D., Dong, P., Kvidahl, L., Evans, N., and A. Treaster. "*Practical Welding Techniques to Minimize Distortion in Lightweight Ship Structures.*" *J Ship Prod* 22 (2006): pp 239–247.
- [9] Pilarczyk J. *Poradnik inżyniera. Spawalnictwo*, Tom 1, WNT, Warszawa 2003.
- [10] Kaczmar W., *Techniki wytwarzania. Spawalnictwo*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1979.
- [11] Ferenc K, *Spawalnictwo*, WNT, Warszawa 2010
- [12] Mistur L., *Spawanie łukowe w osłonach gazowych według wytycznych krajowych i międzynarodowych*, Wydawnictwo KaBe, Krosno 2010.
- [13] Ferenc K., Ferenc J., *Konstrukcje spawane – połączenia*, WNT, Warszawa 2006
- [14] S. Kanchidurai, P. A. Krishanan, K. Baskar and K Saravana Raja Mohan., *A review of inducing compressive residual stress – shot peening; on structural metal and welded connection*, ICCIEE 2017 pp 2-4.
- [15] Haagensen P J 2011 *Fatigue strength improvement methods*. Norwegian University of Science and Technology. Norway.pp 3-6.
- [16] Kasra Ghahremania 2015 *Fatigue Strength Improvement of Aluminum and High Strength Steel Welded Structures using High Frequency Mechanical Impact Treatment*. *Procedia Eng.* 133 pp 473-476.
- [17] Joern Berg and Natalie Stranghoener 2014 *Fatigue strength of welded ultra-high strength steels improved by high frequency hammer peening*. *Procedia Mater. Sci.* 3 pp 71-76.

- [18] Friedrich Bleicher *Improving the tribological characteristics of tool and mould surfaces by machine hammer peening*. CIRP Annals – Manuf. Technol. 2013 62 pp 239-241.
- [19] P. Gerster, F. Schafers, M Leitner, *Pneumatic Impact Treatment (PIT) – Application and Quality Assurance*, IIW Document XIII-WG2-138-13 pp 3-7.
- [20] J. Brózda: *Stale konstrukcyjne i ich spawalność*. Wydanie drugie, Instytut Spawalnictwa, Gliwice 2009.
- [21] P. Sędek „*Odprężanie mechaniczne*”, Praca Zbiorowa pod redakcją prof. dr. hab. inż. Jana Pilarczyka, Poradnik Inżyniera, Spawalnictwo, Wyd. WNT W-wa, 2003.
- [22] L. Dobrzański, *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2002.
- [23] Michaleris, P., Dantzig, J., Tortorelli, D., 1999. Minimization of welding residual stress and distortion in large structures. pp 362-365.
- [24] Perić, M., Tonković, Z., Rodić, A., Surjak, M., Garašić, I., Boras, I., Švaić, S., 2014. Numerical analysis and experimental investigation of welding residual stresses and distortions in a T-joint fillet weld. *Materials and Design*, 53, pp 1055-1059.
- [25] Sattari-Far, I., Farahani, M.R., 2009. Effect of the weld groove shape and pass number on residual stresses in butt-welded pipes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 86(11), pp 725-728.
- [26] Schenk, T., Richardson, I.M., Kraska, M., Ohnimus, S., 2009. A study on the influence of clamping on welding distortion. *Computational Materials Science*, 45(4) pp 1002-1004.

- [27] Teng, T., Fung, C., Chang, P., Yang W., 2001. Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 78, pp 526-531.
- [28] Veiga, C., Loureiro, A., Pina, J.C.P., Batista, A.C., 2002. Residual Stress Distribution in Butt Welded Joints – Effect of the Weld Groove Shape. *Materials Science Forum*, pp 389-391.
- [29] Watanabe, M., Satoh, K., 1961. Effect of welding conditions on the shrinkage and distortion in welded structures. *Welding Journal*, 40(8) pp 421-426.
- [30] Feng, Z., 2005. *Processes and mechanisms of welding residual stress and distortion*. Woodhead Publishing and Maney Publishing.
- [31] Gannon, L., Liu, Y., Pegg, N., Smith, M., 2010. Effect of welding sequence on residual stress and distortion in flat-bar stiffened plates. *Marine Structures*, 23(3) pp 387-394.
- [32] Howes, M., Inoue, T., Park, M., 2002. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*.
- [33] A.V. Adedayo, S.A. Ibitoye and O.A. Oyetoyan, *Annealing Heat Treatment Effects on Steel Welds* January 2010 *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering* 09(06) pp 549-551.
- [34] Chuan Liu, Jiabin Shen, Jialing Yan, Qiaoling Chu, Jianxin Wang, and Yong Zhao *Experimental Investigations on Welding Stress Distribution in Thick Specimens After Postweld Heat Treatment and Ultrasonic Impact Treatment*, March 2020 *Journal of Materials Engineering and Performance* 29(8) pp 1823-1824.
- [35] P. Boryło, L. Sozańska-Jędrasik, K. Gołombek, *Zastosowanie skaningowej mikroskopii elektronowej w badaniach materiałów inżynierskich*, LAB 2/2019 str. 6.

- [36] S.J. Skrzypek, *Nowe możliwości pomiaru makronaprężeń własnych materiałów przy zastosowaniu dyfrakcji promieniowania X w geometrii stałego kąta padania*, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2002.
- [37] W. Kwaśny, *Prognozowanie własności powłok PVD i CVD na podstawie wielkości fraktalnych opisujących ich powierzchnię*, Monografia, International WORLD PRESS, Gliwice 2009.
- [38] M. Faryna, *Analiza zależności krystalograficznych faz składowych w kompozytach z osnową ceramiczną*. Instytut Metalurgii i Inżynierii materiałowej PAN, Kraków (2003) 1-116 ISBN 83-915145-7-9
- [39] B. D. Cullity *Podstawy dyfrakcji promieni rentgenowskich*, PWN, Warszawa, 1964
- [40] Z. Bojarski, E. Łągiewka, *materiały do ćwiczeń z rentgenowskiej analizy strukturalnej – Zeszyt 5*, Wyd. Uniwersytet Śląski, Katowice 1982
- [41] S. Mackiewicz, *Dyfraktometria rentgenowska w badaniach nieniszczących – nowe normy europejskie*, Materiały konferencyjne: Krajowa Konferencja Badań Radiograficznych – „Popów 2005”, 26-28 Września 2005.
- [42] Z. Bojarski, E. Łągiewka, *materiały do ćwiczeń z rentgenowskiej analizy strukturalnej – Zeszyt 2*, Wyd. Uniwersytet Śląski, Katowice 1982.
- [43] J. Tarasiuk, *Badanie mechanizmów rekrytalizacji w metalach: modele rekrytalizacji i narzędzia analizy tekstury i mikrostruktury*, Wyd. AGH, Kraków, 2007.

- [44] P. Lehto, H. Remes, *EBSD characterisation of grain size distribution and grain sub-structures for ferritic steel weld metals* Welding in the World 2022 pp. 363-365.
- [45] M. Rahmann, N. Enzinger and C. Sommitsch: “*Deformation and distortion induced by pneumatic impact treatment (PIT) in a welded joint for HS steel*”, Proceedings of the International Workshop on Thermal Forming and Welding Distortion, Bremen, April 6th-7th, 2011, pp. 203-213.
- [46] H.C. Yildirim, G.B. Marquis and Z. Barsoum: „Fatigue assessment of high frequency mechanical impact (HFMI)-improved fillet welds by local approaches“, *International Journal of Fatigue*, 52, 2013, pp. 57-67.
- [47] Hildebrand J., Werner F.: *Change of structural condition of welded joints between high-strength fine-grained and structural steels*, Journal of civil engineering and management. 2004, No 2, pp 87-95.
- [48] M.S. Zhao, S.P. Chiew, C.K. Lee, *Post weld heat treatment for high strength steel welded connections*, Journal of Constructional Steel Research, Volume 122, 2016, pp 167-177, ISSN 0143-974X.
- [49] Friedrich Bleicher 2012 Mechanism of surface modification using machine hammer peening technology. CIRP Annals – Manuf. Technol. 61 pp 375-378.
- [50] Przybyła M, Górka J, Rzeźnikiewicz A. *Properties of joints welded using the mag method S355J2+N steel after peening process*. The 12th International Conference on Modern Manufacturing Technologies in Industrial Engineering. ModTech 2024. Book of abstracts. ModTech Publishing House; 2024. pp 48.

- [51] Guénhaël Le Quilliec. *Application du martelage à haute fréquence à l'optimisation de la maintenance des ouvrages et des structures soudées*. Mécanique des structures [physics.class-ph]. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2011. Français, pp 24.
- [52] Kik T, Górka J, Przybyła M. *Numerical analysis of stress and strain state in membrane walls weld joints performed by submerged arc welding*. International Journal of Modern Manufacturing Technologies. 2022;14:90–95. doi:10.54684/ijmmt.2022.14.2.90 pp 92-93.
- [53] K.K. Tho, S. Swaddiwudhipong, Z.S. Liu, K. Zeng, *Simulation of instrumented indentation and material characterization*, Materials Science and Engineering: A, Volume 390, Issues 1–2, 2005, Pages 202-209, ISSN 0921-5093, pp 207.
- [54] Górka J, Przybyła M. *Research on the influence of HMF and PWHT treatments on the properties and stress states of MAG-welded S690QL steel joints*. Materials. 2024;17:1–17. doi:10.3390/ma17143560, pp 18.
- [55] Lieurade H.P., Huther I., Lefebvre H.: *Effect of weld quality and post weld improvement techniques on the fatigue resistance of extra high strength steel*, Doc. IIW-1863-07 (ex-doc XI11-2184-07), Welding in the World, 2008, vol. 52, no. 7/8, Research Supplement, pp. 106–115.
- [56] Manteghi S., Maddox S.J.: *Methods for fatigue life improvement of welded joints in medium and high strength steels*, IIW Doc. XIII-2006–04, 2004.
- [57] Przybyła M, Górka J. *Wpływ przekuwania o wysokiej częstotliwości na kwalifikowanie technologii spawania stali S960QL*.

W: Górka J, redaktor. Nowoczesne zastosowania technologii spawalniczych : Sympozjum Katedr i Zakładów Spawalnictwa, Brenna, 20-22 czerwca 2023 r. Praca zbiorowa. 2023. s. 205–214. (Górka J, ed.).

[58] T. Nitschke-Pagel, K. Dilger, H. Eslami, Weich et t. Ummenhofer : *Residual stresses and near surface material condition of welded high strength steels after high frequency mechanical post-weld treatments*. International Institute of Welding (IIW), (XIII-2153-07), 2007 pp 1-2.

[59] Y. F. Kudryavtsev, J. Kleiman et V. Knysh : *Fatigue strength of structural elements with cracks repaired by welding*. International Institute of Welding (IIW), (XIII-2236-08).

[60] Kudryavtsev, Y. (2011). *Fatigue Improvement of Welded Elements by Ultrasonic Impact Treatment*. In: Proulx, T. (eds) Experimental and Applied Mechanics, Volume 6. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, New York, NY. pp. 3-7.

[61] Hansen A.V., Agerskov H., Bjørnbak-Hansen J.: *Improvement of fatigue life of welded structural components by grinding*, Doc. IIW-1779-06 (ex-doc XIII-2051–05), Welding in the World, 2007, 51, no. 3/4, pp. 61–67. pp 62-64.

[62] Przybyła M, Górka J. *Przekuwanie spoin jako metoda redukcji odkształceń po spawalniczych w połączeniach spawanych ścian sitowych z płaszczem kondensatora pary*. W: Górka J, redaktor. Nowoczesne zastosowania technologii spawalniczych : Sympozjum Katedr i Zakładów Spawalnictwa, Brenna, 21-23 czerwca 2022 r. Praca zbiorowa. 2022. s. 361–373. (Górka J, ed.). pp 368-371.

- [63] Hyungyil Lee, Jin Haeng Lee, George M. Pharr, *A numerical approach to spherical indentation techniques for material property evaluation*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Volume 53, Issue 9, 2005, Pages 2037-2069, ISSN 0022-5096.
- [64] Kensik R.: *Ocena energii liniowej w procesach MIG/MAG*. Przegląd Spawalnictwa, Vol. 78 (9-10), pp. 5-8, 2006.
- [65] Kensik R., Kudła K.: *Zasady sterowania łukiem spawalniczym*. Welding Technology Review, Vol. 70(6), 1998 pp. 1-5.
- [66] Funderbruk R.S.: *A look at the heat in put*. Welding Innovation, Vol. XVI, No. 1, 1999 pp. 8-11.
- [67] Kudła K.: *Samoregulacja łuku w procesie MIG/MAG PLUS*. Welding Technology Review, Vol. 78 (9-10), 2006, pp. 12-15.
- [68] Krauss G.: *Steels. Processing, Structure and Performance*, Second Edition, ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 2015. ISBN: 978-1-62708-083-5.
- [69] Kudła K., Wojsyk, K.: *Normowana energia liniowa a ilość ciepła wprowadzonego podczas spawania*. Przegląd Spawalnictwa, Vol. 82 (12), pp. 21-25, 2010.
- [70] Kudła K., Wojsyk K.: *Czy sposób doprowadzania ciepła ma istotny wpływ na geometrię spoin?* Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach, Vol. 56 (5), pp. 140-144, 2012.
- [71] Kukielka L.: *Podstawy badań inżynierskich*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2002.
- [72] Weman K.: *Welding processes handbook*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2003.
- [73] Radaj D.: *Heat Effects of Welding – Temperature Field, Residual Stress, Distortion*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1992.

- [74] Draper J.: *Modern Metal Fatigue Analysis*. Warrington : EMAS Publications, 2008.
- [75] Böß V. i inni.: *Numerical simulation of process forces during re-contouring of welded parts considering different material properties*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2013, Tom 6, 3, pp 167-174.
- [76] R.Baptista, V. Infante, C. Branco. *Fully Dynamic Numerical Simulation of the Hammer Peening Fatigue Life Improvement Technique*. s.l. : Procedia Engineering 10, 2011. pp. 1943-1948.
- [77] Dally J.W., Riley W.F.: *Experimental Stress Analysis* 3 rd. New York : McGraw-Hill Inc, 1991.
- [78] G. LE Quilliec, H-P. Lieurade, M. Bousseau, M. Drissi-Habti, G. Ingelbert, P. Macquet, L. Jubin. *Fatigue Behaviour of Welded Joints Treated by High Frequency Hammer Peening: Part II, Numerical study*. s.l. : International Institute of Welding, 2012. XIII-2395-11.
- [79] Bućko S., Jodłowski H., Trzebnicki M.: *Doświadczalno-numeryczna analiza pierwszej fazy odkształceń plastycznych w stalach z niestatecznością materiałową*. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2015.
- [80] Long, H., Gery, D., Carlier, A., Maropoulos, P.G., 2009. *Prediction of welding distortion in butt joint of thin plates*. Mater. Des. 30, 4126–4135.
- [81] Deng, D., Liang, W., Murakawa, W., 2007. *Determination of welding deformation in fillet-welded joint by means of numerical simulation and comparison with experimental measurements*. J. Mater. Process. Technol. 183, pp. 219–225.

- [82] T. Bjork, A. Ahola, N. Tuominen, *On the design of fillet welds made of ultra-high-strength steel*, Weld. World 62 (2018) pp 985–995,
- [83] Mehran Ghafouri, Antti Ahola, Joseph Ahn, Timo Björk, *Welding-induced stresses and distortion in high-strength steel T-joints: Numerical and experimental study*, Journal of Constructional Steel Research, Volume 189, 2022, 107088, ISSN 0143-974X, pp 4-9.
- [84] Paulo Cezar Adamczuk, Ivan Guerra Machado, Jose Antonio Esmerio Mazzaferro, *Methodology for predicting the angular distortion in multi-pass butt-joint welding*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 240, 2017, Pages 305-313, ISSN 0924-0136, pp 305-309.
- [85] D. Walker. *Residual Stress Measurement Techniques*. Advanced materials & processes. 2001, pp. 30-33.
- [86] A. Abdullach, M. Malaki, A. Eskandari. *Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening*. s.l. : Materials and Design 38 (2013), 2012. pp. 7-18.
- [87] F. A. Kandil, D. Lord, A .T. Fry, P. V. Grant. *A review of residual stress measurement methods. A guide to technique selection*. 2001.
- [88] Draper J.: *Modern Metal Fatigue Analysis*. Warrington. : EMAS Publications, 2008.
- [89] C. Deng, Y. Liu, B. Gong, D. Wang. *Numerical implementation for fatigue assessment of butt joint improved by high frequency mechanical impact treatment: A structural hot spot stress approach*. s.l.: International Journal of Fatigue 92, 2016. pp. 211-219.
- [90] J. Outinen, P. Makelainen, *Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures and after cooling down*. Christchurch:

s.n., March 2002. Second International Workshop "Structures in Fire". pp. 273-290.

[91] Suominen, L.; Khurshid, M.; Parantainen, J. *Residual stresses in welded components following post-weld treatment methods*. Procedia Eng. 2013, 66, pp 181–191.

[92] H. Ilker Yelbay, Ibrahim Cam, C. Hakan Gür, *Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by Magnetic Barkhausen Noise technique*, NDT & E International, Volume 43, Issue 1, 2010, Pages 29-33, ISSN 0963-8695.

[93] P. Vourna, A. Ktena, P.E. Tsakiridis, E. Hristoforou, *An accurate evaluation of the residual stress of welded electrical steels with magnetic Barkhausen noise*, Measurement, Volume 71, 2015, Pages 31-45, ISSN 0263-2241.

[94] Lu, W.; Sun, J.; Su, H.; Gao, C.; Zhang, X. *Experimental Research of Welding Residual Stress of Butt Welded Joint of Thick Steel Plate*. Metals 2023, 13, pp 120.

[95] Liskevych, Olga & Fiorin, Ana & Almeida, Elton & Feijó, Gabriel & Oliveira, Rogério & Macêdo, Marcelo. (2024). *An Experimental Approach for Correlation of the Magnetic Barkhausen Noise to Microstructural Changes and Residual Stress in Welding Joints*. Soldagem & Inspeção. 29. 10.1590/0104-9224/si29.08. pp 2-3.

[96] E. Mikkola, H. Remes, G. Marquis. *Influence of residual stresses on elasto-plastic response in HFMI-Treated welded joint under different load ratios*. s.l. : International Institute of Welding, 2015. XIII-2591-15.

[97] E. Mikkola, H. Remes, G. Marquis. *A finite element study on residual stress stability and fatigue damaging high-frequency*

mechanical impact (HFMI)-treated welded joint. s.l.: International Journal of Fatigue 94 (2017), 2013. pp. 16-29.

[98] V. Hardenacke, M. Farajian, D. Siegele. *Modelling and simulation of the high-frequency mechanical impact (HFMI) treatment of welded joints*. s.l. : International Institute of Welding, 2014. pp. 1-10. XIII-2533-14.

[99] E.J. Pavlina, C.J. Van Tyne. *Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels*. s.l. : ASM International, Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 17 (6), 2008. pp. 888-893.

[100] E. Harati, L-E. Svensson, L. Karlsson, K. Hurtig. *Effect of HFMI treatment on weld toe geometry and fatigue properties of high strength steel welds*. s.l. : Procedia Structural Integrity 2, 2016. pp. 3483-3490.

[101] M. Farajian, V. Hadernacke, J. Preussner, W. PfeifferR, D. Siegele. *Description of the Surface and Subsurface Material Conditions after Applying High Frequency Mecanical Impact (HFMI) Treatment, Shot Peening and Deep Rolling*. s.l. : International Institute of Welding, 2014. XIII-2532-14.

WYKAZ PRZYWOŁANYCH NORM

- 1n. ISO/TR 18491:2015 *Welding and allied processes – Guidelines for measurement of welding energies.*
- 2n. ISO/TR 17671:2002 *Welding – Recommendations for welding of metallic materials – Part 1: General guidance for arc welding*
- 3n. PN-EN 10025-2:2019 *Wyroby walcowanie na gorąco ze stali konstrukcyjnych – Część 2: Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych niestopowych.*
- 4n. PN-EN 10025-3:2019 *Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych – Część 3: Warunki techniczne dostawy spawalnych stali konstrukcyjnych drobnoziarnistych po normalizowaniu /walcowaniu normalizującym.*
- 5n. PN-EN 10025-6:2019 *Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych – Część 6: Warunki techniczne dostawy spawalnych stali konstrukcyjnych o podwyższonej granicy plastyczności w stanie hartowanym i odpuszczonym.*
- 6n. PN-EN ISO 15614-1:2017-08 *Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali – Badanie technologii spawania – Część 1: Spawanie łukowe stali oraz spawanie łukowe niklu i stopów niklu.*
- 7n. PN-EN ISO 3452-1:2021-12 *Badanie nieniszczące spoin – Badania penetracyjne – Część 1: Zasady ogólne.*
- 8n. PN-EN ISO 17638:2017-01 *Badanie nieniszczące spoin – Badanie magnetyczno-proszkowe.*
- 9n. PN-EN ISO 17640-1:2019-01 *Badanie nieniszczące spoin – Badanie ultradźwiękowe – Część 1: Techniki, poziomy badania i ocena.*

10n. PN-EN ISO 4136:2013-05 *Badania niszczące złączy spawanych metali – Próba rozciągania próbek poprzecznych.*

11n. PN-EN ISO 5173:2010 *Badania niszczące złączy spawanych metali – Badanie na zginanie.*

12n. PN-EN ISO 9016:2013-05 *Badania niszczące złączy spawanych metali – Badanie udarności – Usytuowanie próbek, kierunek karbu i badanie.*

13n. PN-EN ISO 9015-1:2011 *Badania niszczące złączy spawanych metali – Badanie twardości – Część 1: Badanie twardości złączy spawanych łukowo.*

14n. PN-EN ISO 17639:2013-12 *Badania niszczące złączy spawanych metali – Badania makroskopowe i mikroskopowe złączy spawanych.*

15n. PB01 *Procedura badania stanu naprężenia w elementach stalowych z wykorzystaniem efektu Barkhausena – Bolesław Augustyniak NNT.*