

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
TECHNOLOGICZNY

Katedra Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej

Rozprawa doktorska

*Minimalizacja odkształceń cieplnych w wyniku
inteligentnej optymalizacji rozmieszczenia punktów
mocowań w obszarze komponentu spawanego*

mgr inż. Tomasz Zadorożny

Promotor naukowy:

dr hab. inż. Mirosław Szczepanik prof. PŚ

Gliwice 2023

1	Wprowadzenie.....	4
1.1	Cel i teza pracy	8
2	Proces spawania, przyrządy spawalnicze, prostowanie	9
2.1	Skurcze kierunkowe oraz przestrzenny rozkład naprężenia	9
2.2	Bazowanie komponentów podczas procesu spawania – przyrządy spawalnicze .	12
2.2.1	Narzędzia dociskowe	12
2.2.2	Bazy nastawcze.....	14
2.2.3	Rozpory technologiczne	16
2.2.4	Wzorniki kształtu.....	16
2.3	Przeciwdziałanie odkształceniom trwałym.....	18
2.3.1	Prostowanie płomieniowe.....	18
2.3.2	Sposób nagrzewania	20
2.3.3	Wpływ temperatury oraz czasu nagrzewania na strukturę oraz własności materiału.....	22
2.3.4	Przykład pracy materiału podczas nagrzewania i chłodzenia	23
2.3.5	Prostowanie poszyć	24
2.3.6	Prostowanie na zimno przy użyciu młotków.....	25
2.3.7	Prostowanie na zimno na prasie	26
2.3.8	Uszkodzenia trwale występujące po procesie prostowania.....	27
3	Modelowanie procesu spawania w metodzie elementów skończonych.....	30
3.1	Sformułowanie problemu w metodzie elementów skończonych	32
3.2	Modelowanie oraz przyłożenie źródła ciepła	35
3.3	Uwzględnienie zjawiska topnienia oraz krzepnięcia	37
3.4	Sformułowanie równań konstytutywnych Lagrangea	38
3.5	Implementacja w metodzie elementów skończonych.....	40
3.6	Wpływ rodzaju elementu na czas i precyzję obliczeń	42
4	System optymalizacji	45
4.1	Opis funkcji celu oraz kryteriów optymalizacji.....	47
4.2	Opis opracowanego systemu optymalizacji.....	48
4.2.1	Analiza przestrzeni rozwiązań – poszukiwanie rozwiązania optymalnego ..	52
4.3	Algorytmy wspomagające przygotowanie modelu numerycznego	54
4.3.1	Modelowanie spoiny w środowisku HyperWorks, algorytm wspomagający	55
4.3.2	Tworzenie komponentów reprezentujących rozmieszczenie podpór.....	57
4.4	Opis opracowanego systemu optymalizacji na przykładzie	59
4.5	Wpływ kolejności spawania na uzyskane wyniki.....	64

5	Porównanie wyników optymalizacji rozmieszczenia podpór z testami rzeczywistymi dla komponentu o skomplikowanej geometrii	66
5.1	Model CAD poszycia.....	67
5.2	Model spoiny	68
5.3	Materiały	68
5.4	Warunki brzegowe	69
5.5	Sekcja boczna – operacja nr 1 – schemat przebiegu optymalizacji.....	69
5.5.1	Sekcja boczna – operacja nr 1 – wyniki obliczeń.....	73
5.6	Sekcja boczna – operacja nr 2 – warunki brzegowe	74
5.6.1	Sekcja boczna – operacja nr 2 – wyniki obliczeń.....	76
5.7	Sekcja boczna – operacja nr 3 – warunki brzegowe	77
5.7.1	Sekcja boczna – operacja nr 3 – wyniki obliczeń.....	80
5.8	Sekcja boczna – operacja nr 4 – warunki brzegowe	81
5.8.1	Sekcja boczna – operacja nr 4 – wyniki obliczeń.....	84
5.9	Sekcja środkowa – operacja nr 1 – warunki brzegowe.....	85
5.9.1	Sekcja środkowa – operacja nr 1 – wyniki obliczeń	88
5.10	Sekcja środkowa – operacja nr 2 – warunki brzegowe.....	88
5.10.1	Sekcja środkowa – operacja nr 2 – wyniki obliczeń	90
5.11	Sekcja środkowa – operacja nr 3 – warunki brzegowe.....	91
5.11.1	Sekcja środkowa – operacja nr 3 – wyniki obliczeń	93
5.12	Sekcja środkowa – operacja nr 4 – warunki brzegowe.....	94
5.12.1	Sekcja środkowa – operacja nr 4 – wyniki obliczeń	96
5.13	Sekcja środkowa – operacja nr 5 – warunki brzegowe.....	97
5.13.1	Sekcja środkowa – operacja nr 5 – wyniki obliczeń	99
5.14	Sekcja środkowa – operacja nr 6 – warunki brzegowe.....	100
5.14.1	Sekcja środkowa – operacja nr 6 – wyniki obliczeń	102
5.15	Sekcja środkowa – operacja nr 7 – warunki brzegowe.....	102
5.15.1	Sekcja środkowa – operacja nr 7 – wyniki obliczeń	106
5.16	Sekcja środkowa – operacja nr 8 – warunki brzegowe.....	106
5.16.1	Sekcja środkowa – operacja nr 8 – wyniki obliczeń	109
5.17	Korelacja z pomiarami.....	110
5.17.1	Porównanie wymiaru Y1	113
5.17.2	Porównanie wymiaru Z1	113
5.17.3	Porównanie wymiarów Y10 oraz Y'10.....	114
5.17.4	Porównanie wymiarów Y20 oraz Y'20.....	116

5.17.5	Porównanie wymiarów Y22 oraz Y'22	117
5.17.6	Porównanie wymiarów Y24 oraz Y'24	119
5.17.7	Podsumowanie.....	120
6	Zakończenie	121
7	Bibliografia.....	123

1 Wprowadzenie

Trwa czwarta rewolucja przemysłowa, nazywana Przemysłem 4.0. Ideą przemysłu 4.0 jest integracja inteligentnych maszyn, systemów oraz wprowadzania zmian we wszelakich procesach produkcyjnych tak aby zwiększyć ich wydajność. Procesy produkcyjne można również usprawnić poprzez zastosowanie narzędzi do ich symulacji i optymalizacji w połączeniu z algorytmami usprawniającymi modelowanie procesu oraz sztucznej inteligencji. Powszechnie stosowaną w przemyśle techniką łączenia metali jest spawanie łukowe. Polega ona na wytworzeniu łuku elektrycznego między elektrodą spawalniczą a materiałem podstawowym. Jarzący się łuk powoduje topienie się materiału, który po zastygnięciu tworzy trwałe połączenie nazywane spoiną. Najczęściej stosowanymi metodami spawania łukowego są metody MIG, MAG i TIG.

W wyniku procesu spawania pojawiają się odkształcenia spawalnicze. Odkształcenia spawalnicze to zniekształcenia oraz deformacje spowodowane procesami cieplnymi. Konstrukcje zmieniają swój kształt oraz wymiar co przekłada się na obniżenie własności estetycznych oraz użytkowych. Często nadmierne deformacje powodują konieczność przeprowadzenia naprawy poprzez prostowanie co może skutkować zwiększonymi kosztami oraz może zakończyć się niepowodzeniem, zniszczeniem konstrukcji.

Najczęściej występującymi rodzajami odkształceń spawalniczych są:

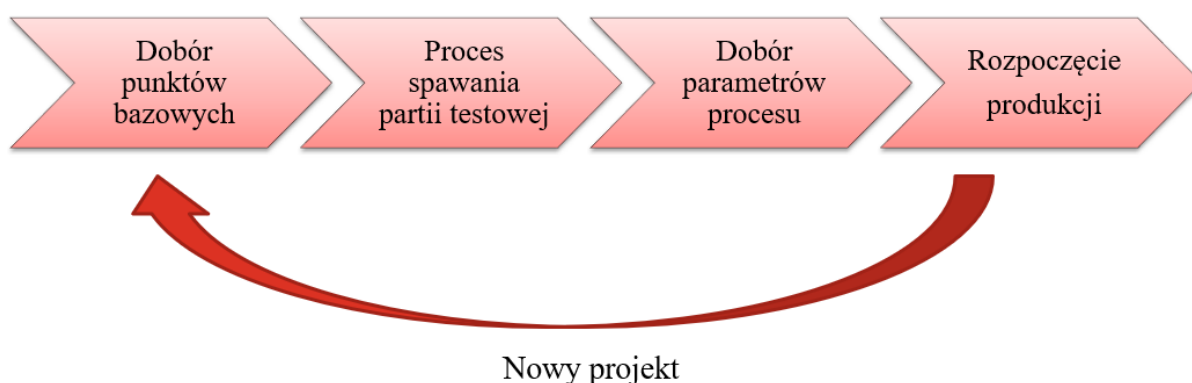
- odkształcenia wzdłużne – zmiana wymiarów liniowych elementów przebiegająca wzdłuż osi spoiny,
- odkształcenia poprzeczne – zmiana wymiarów liniowych elementów przebiegająca prostopadle do osi spoiny,
- skrotne – odkształcenie kątowe pomiędzy przekrojami poprzecznymi łączonych elementów,
- kątowe – zmiana kąta pomiędzy łączonymi elementami.
- utrata płaskości – odkształcenia płaszczyzny łączonych elementów, pofalowania powierzchni.

Na wielkość wyżej wymienionych odkształceń spawalniczych mają wpływ:

- geometria spawanej konstrukcji,
- sztywność elementów,
- energia liniowa,
- własności cieplnomechaniczne łączonych materiałów,
- technologia spawania (punkty mocowań konstrukcji, parametry procesu).

W wielu przypadkach zastosowanie odpowiedniej technologii spawania znacząco obniża odkształcenia spawalnicze. Procesy cieplne są ściśle związane z parametrami takimi jak prąd spawania, prędkość spawania, rodzaj materiału czy rodzaj gazu osłonowego. Zmiana tych ustawień jest mocno ograniczona poprzez wymagania dotyczące jakości spoin, często również w nieznacznym stopniu ulega wahaniom podczas całego procesu, z tego powodu ważną rolę w minimalizacji odkształceń cieplnych stanowi odpowiednie zamocowanie komponentu. Podczas mocowania komponentów w przyrządach spawalniczych można uzyskać odpowiednie ułożenie poszczególnych części, ich

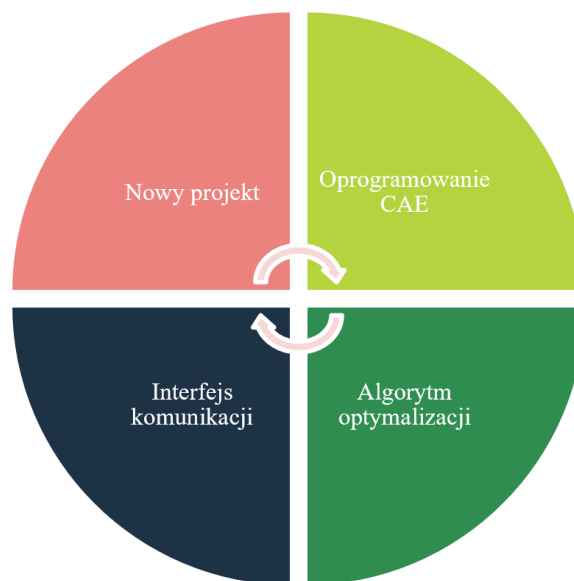
odpowiedni docisk lub też przegięcie wstępne, które po wystąpieniu skurczu jest niwelowane a finalny komponent nie wykazuje zniekształceń. Z powodów technologicznych nie jest możliwe sztywne utwierdzenie każdej powierzchni a ilość i wielkość baz dociskowych jest mocno ograniczona. Spawanie złożonych elementów może stwarzać różne problemy. Parametry procesu dobierane są na podstawie ogólnej wiedzy technologa oraz inżyniera spawalnika. Przy skomplikowanych kształtach nie jest możliwe oszacowanie strefy wpływu ciepła, skurczu oraz deformacji podczas spawania. Wiedza bazująca na poprzednich doświadczeniach często nie jest wystarczająca z racji zupełnie innych kształtów oraz przeznaczenia nowych produktów. Stanowi to szczególnie duży problem przy małoseryjnej produkcji, gdzie dostosowanie punktów wiązań konstrukcji w trakcie trwania procesu wymaga wielu prób i nierzadko produkcja nie zostaje wystarczająco dopracowana na etapie procesu jej przygotowania. Prowadzi to do wielu problemów produkcyjnych oraz potrzeby dostrajania parametrów już w czasie trwania procesu produkcyjnego. To z kolei może powodować wady produkcyjne oraz opóźnienia. Na rys. 1 przedstawiony został schemat blokowy, który często występuje przy produkcji małoseryjnej, gdzie nadmierne odkształcenia stanowią realny problem. Schemat blokowy małoseryjnej produkcji z wyłączeniem symulacji numerycznej procesu.



Rys. 1. Schemat blokowy małoseryjnej produkcji z wyłączeniem symulacji numerycznej procesu

Rozwiązaniem problemów związanych z odpowiednim doбором punktów utwierdzenia (punktów bazowych, punktów wiązań) konstrukcji podczas procesu spawania może okazać się zastosowanie symulacji numerycznych oraz procesu optymalizacji. Rozwój komputeryzacji daje duże możliwości w zakresie komputerowego wspomaganie projektowania (*ang. Computer Aided Engineering CAE*). Obecnie na rynku istnieje wiele komercyjnych programów metody elementów skończonych (MES). Programy te nie tylko umożliwiają wykonywanie skomplikowanych analiz numerycznych, ale również parametryzację opracowanych modeli oraz pośrednią ingerencję w ich działanie poprzez zastosowanie języków programowania właściwych dla danego środowiska. Dzięki opracowywanym w ten sposób podprogramom – skryptom, możemy dostosowywać ich działanie do naszych potrzeb, co wymaga dużych kompetencji oraz wiedzy związanej z danym oprogramowaniem, projektowaniem oraz metodą elementów skończonych. Dodatkowo możemy połączyć zalety komercyjnego oprogramowania MES z algorytmami optymalizacji budując w ten sposób złożone systemy CAE. Ze względu na oszczędność zużycia materiału, energii czy też finalną masę produktu, inżynier dąży do uzyskania jak najlepszego rozwiązania. Do tego dochodzi często presja czasu, a więc nie tylko

poszukujemy najlepszego rozwiązania, ale dodatkowo w jak najkrótszym czasie. Trudno jest oczywiście uzyskać rozwiązanie optymalne w sensie globalnym w krótkim czasie, ale rozwiązanie o wiele lepsze od rozwiązania wyjściowego okazuje się często wystarczająco dobre. W celu otrzymania najlepszego rozwiązania w jak najkrótszym czasie stosowane są metody optymalizacji, w tym również algorytmy sztucznej inteligencji. Wśród nich można wymienić m. in.: algorytmy ewolucyjne, rojowe, immunologiczne, czy sieci neuronowe. Wspólną cechą tych algorytmów jest inspiracja specyficznymi mechanizmami występującymi w naturze. Połączenie zalet różnych metod i programów może w efekcie prowadzić do powstania złożonego systemu optymalizacji, który znajdzie najlepsze lub wystarczająco dobre rozwiązanie problemu. Taką próbę podjęto w niniejszej pracy. Zaprezentowana metoda zakłada, iż dla każdej nowej konstrukcji spawanej zaprojektowanej w przedsiębiorstwie zostanie wykonana symulacja procesu, która umożliwi minimalizację możliwych odkształceń termicznych. W tym celu zbudowano system łączący środowisko metody elementów skończonych w postaci komercyjnego oprogramowania HyperMesh współpracujące z oprogramowaniem OptiStruct, stosowanym do przeprowadzenia symulacji procesu spawania oraz autorskie algorytmy wspierające proces tworzenia modelu oraz optymalizacji rozmieszczenia punktów wiązań (rys. 2). Algorytmy zostały zaimplementowane w języku programowania TCL, właściwym dla wyżej wspomnianych programów.



Rys. 2. Schemat blokowy systemu optymalizacji rozmieszczenia punktów montażowych w obszarze komponentu spawanego

Dzięki zastosowaniu takiego systemu, proces doboru punktów utwierdzenia znacznie się skraca. Ponadto system umożliwia dobór odpowiednich parametrów na wczesnym etapie przygotowania produkcji, a co za tym idzie – eliminuje konieczność dostosowywania parametrów podczas procesu produkcyjnego. Przekłada się to na znaczne oszczędności płynące z braku konieczności uporczywych napraw czy też, w krytycznych przypadkach, złomowania komponentów. Schemat blokowy opisanego rozwiązania przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat blokowy produkcji z zastosowaniem zaproponowanego systemu optymalizacji

1.1 Cel i teza pracy

Celem pracy doktorskiej realizowanej w ramach programu „Doktorat Wdrożeniowy” jest opracowanie metody optymalizacji rozmieszczenia punktów mocowań w obszarze komponentu spawanego przy użyciu programu metody elementów skończonych oraz algorytmów optymalizacji w celu minimalizacji odkształceń cieplnych po procesie spawania. Dodatkowym celem prowadzonych badań jest wdrożenie w przemyśle innowacyjnych rozwiązań, które pozytywnie wpłyną na proces produkcyjny oraz przyniosą realne oszczędności.

Do zrealizowania pracy niezbędne było wykonanie zadań cząstkowych:

- zapoznanie się z procesem produkcyjnym w przedsiębiorstwie oraz przypadkami deformacji po procesie spawania dla różnych komponentów,
- przegląd literatury w zakresie spawalnictwa oraz symulacji procesów spawania metodą elementów skończonych,
- przeprowadzenie próbnych symulacji w celu wyboru postaci źródła ciepła oraz metody modelowania,
- opracowanie algorytmów wspomagających proces tworzenia modelu numerycznego oraz metody optymalizacji,
- przeprowadzenie procesu optymalizacji dla próbki testowej,
- przeprowadzenie symulacji procesu, który obecnie jest prowadzony w przedsiębiorstwie w celu sprawdzenia zbieżności wyników oraz walidacji zaproponowanego systemu.

Teza rozprawy

Zastosowanie systemu bazującego na połączeniu metody elementów skończonych oraz parametrycznego modelu spawanego komponentu umożliwi odpowiedni dobór punktów mocowań w obszarze konstrukcji spawanej oraz minimalizację odkształceń cieplnych we wczesnym etapie procesu przygotowania produkcji, co przekłada się na znaczną poprawę jakości produktu końcowego oraz eliminuje lub znacząco ogranicza konieczność napraw.

2 Proces spawania, przyrządy spawalnicze, prostowanie

Powszechnie stosowaną w przemyśle techniką łączenia metali jest spawanie łukowe. Polega ona na wytworzeniu łuku elektrycznego między elektrodą spawalniczą a materiałem podstawowym. Jarzący się łuk powoduje topienie się materiału, który po zastygnięciu tworzy trwałe połączenie nazywane spoiną. Najczęściej stosowanymi metodami spawania łukowego są metody MIG, MAG i TIG.

Spawanie metodą MIG (*ang. Metal Inert Gas*) jest prowadzone przy zastosowaniu elektrody topliwej w postaci drutu pełnego, który dodatkowo jest spoiwem. Proces przebiega w osłonie gazów obojętnych, takich jak: argon, hel oraz ich mieszanki. Metodę MIG stosuje się przy spawaniu metali nieżelaznych.

Spawanie metodą MAG (*ang. Metal Active Gas*) jest prowadzone przy zastosowaniu elektrody topliwej w postaci drutu pełnego lub proszkowego, który dodatkowo jest spoiwem. Proces przebiega w osłonie gazów aktywnych, takich jak dwutlenek węgla lub mieszanki gazowej składającej się z: argonu, tlenu, dwutlenku węgla oraz innych. Metodę MAG stosuje się przy spawaniu stali niestopowych, niskostopowych oraz wysokostopowych.

Spawanie metodą TIG (*ang. Tungsten Inert Gas*) jest prowadzone przy zastosowaniu elektrody nietopliwej. Proces przebiega w osłonie gazów obojętnych, takich jak argon, hel oraz ich mieszanki. Metodę TIG stosuje się przy spawaniu metali nieżelaznych oraz stali niskostopowych i wysokostopowych.

Podczas procesu spawania energia elektryczna łuku spawalniczego zostaje zamieniona na energię termiczną, odpowiedzialną za nadtopienie brzegów elementów spawanych oraz ich połączenia. Temperatura, która pojawia się w układzie, musi być na tyle wysoka, aby przejść ze stanu stałego do stanu ciekłego spawanego metalu. Zgodnie z prawem rozszerzalności cieplnej, w obszarach, w których dochodzi do zmiany temperatury, ciało zmienia swoje wymiary zgodnie ze wzorem:

$$x = x_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (2.1)$$

gdzie:

x – długość komponentu po zmianie temperatury,

x_0 – długość początkowa,

α – liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej,

ΔT – zmiana temperatury.

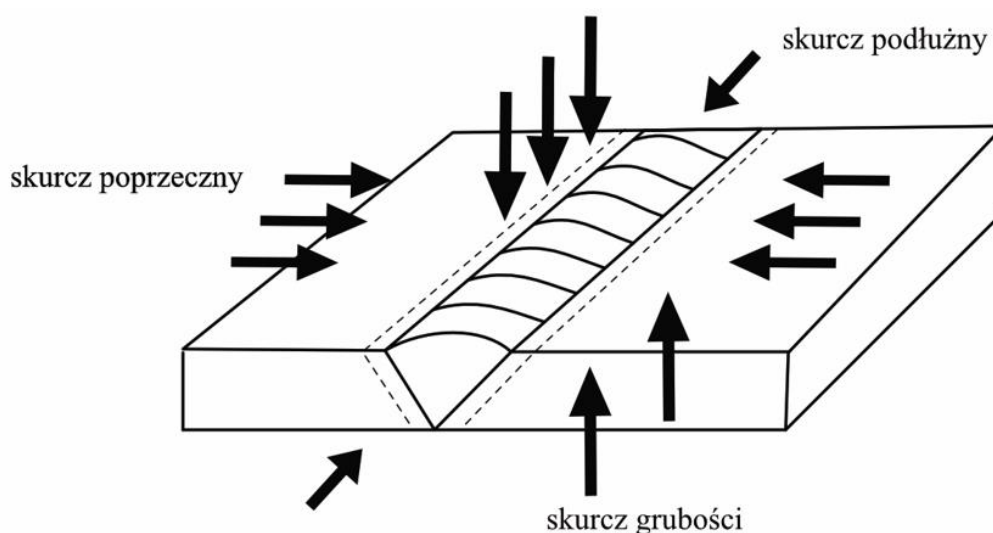
Wpływa to na odkształcenie komponentu podczas spawania, gdzie odkształcenie termiczne jest proporcjonalne do zmiany temperatury.

2.1 Skurcze kierunkowe oraz przestrzenny rozkład naprężenia

Dla niepodpartych oraz nieustalonych w żaden sposób komponentów podczas procesu spawania (komponenty spoczywające swobodnie na stole spawalniczym) odkształcenia termiczne przebiegają w nieukierunkowany sposób, podobnie dzieje się ze skurczem po ochłodzeniu konstrukcji. Skurcz spawalniczy często jest znacznie większy niż rozszerzalność cieplna materiałów łączonych elementów. W wyniku tego zjawiska,

wymiary złącza spawanego ulegają zmniejszeniu, co prowadzi do skrócenia oraz zniekształcenia spawanych elementów. Ponadto, zarówno podłużny, jak i poprzeczny przekrój spoiny ulegają zmniejszeniu a spoina wraz ze strefą nagrzanego materiału, ulega skurczeniu w kierunkach: wzdłużnym, poprzecznym oraz w kierunku grubości materiału.

Podczas spawania, lokalnie w obrębie jeziorka spawalniczego element jest intensywnie nagrzewany do temperatury topnienia stali, podczas gdy reszta elementu pozostaje w temperaturze otoczenia. Kiedy temperatura w spoinie zaczyna spadać, dochodzi do jej skurczu, który jest ograniczony przez mocowanie spoiny w sztywnych ramach mniej nagrzanego obszaru elementu, co prowadzi do odkształceń spawalniczych łączonych elementów oraz powstania naprężeń w tych obszarach. Skurcz spoiny powoduje utworzenie przestrzennego stanu naprężeń spawalniczych, zgodnego z kierunkami zaznaczonymi na rys. 4.

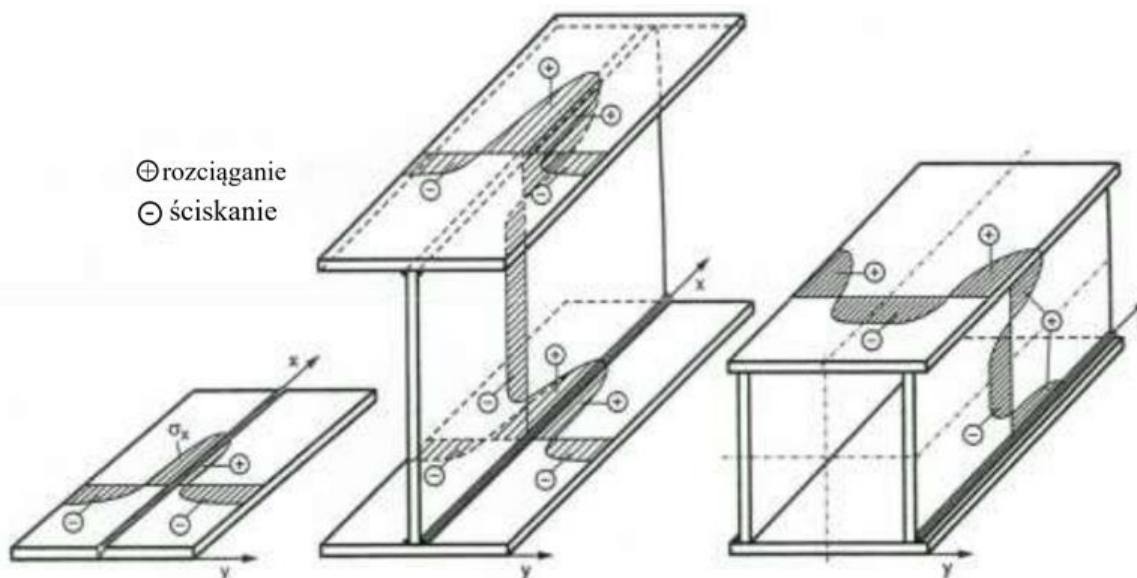


Rys. 4. Schemat kierunków działania skurczu podczas chłodzenia [43]

Skurcz w kierunku grubości spoiny jest swobodny. Oznacza to, że spoina kurczy się w tym kierunku bez wywoływania znacznych naprężeń wewnętrznych. Skurcz poprzeczny podczas spawania elementów, które są swobodnie odłożone, może skutkować ich zbliżeniem („ściągnięciem”) do siebie zgodnie z oznaczeniem na rys. 4. Natomiast w przypadku złącz doczołowych i kątowych, skurcz poprzeczny może powodować odkształcenia kątowe, czyli ugięcia elementów. W złączach doczołowych, odkształcenie kątowe zależy między innymi od kształtu rowka spawalniczego, liczby warstw spoiny oraz grubości materiału spawanego. Natomiast w złączach kątowych, odkształcenie kątowe zależy m.in. od rodzaju złącza, grubości spoiny oraz liczby warstw spoiny.

Skurcz podłużny ma niewielkie znaczenie w przypadku krótkich spoin w złączach spawanych. Jednak w przypadku długich spoin, skurcz podłużny może powodować pofałdowania, wybrzuszenia i wygięcia. Szczególnie charakterystyczne jest pofałdowanie cienkich blach o grubości do 4 mm, które wynika ze skurczu podłużnego. Podczas procesu spawania, metal nagrany w obszarze spoiny nie może się wydłużyć, w efekcie czego metal ten zostaje spęczony powodując odkształcenie plastyczne. Podczas fazy stygnięcia spoiny i przyległego materiału podstawowego, skurcz jest uniemożliwiony przez chłodniejszy metal znajdujący się dalej od spoiny. W rezultacie, w pobliżu stygnącej spoiny powstają

wewnętrzne siły, które wywołują naprężenia rozciągające, podczas gdy w dalszej odległości od spoiny, gdzie temperatura jest znacznie niższa powstają naprężenia ściskające. Fałdowanie cienkich blach jest efektem naprężeń ściskających w obszarze dalszym od spoiny. W wyniku fałdowania, naprężenia rozciągające w spoinie i strefie przyspoinowej są złagodzone, natomiast naprężenia ściskające pozostają w obszarze oddalonym od spoiny. Na rys. 5 przedstawiono przykład rozkładu naprężeń w konstrukcjach spawanych.



Rys. 5. Przykład rozkładu naprężeń w konstrukcjach spawanych [43]

W przypadku blach o większej grubości, gdzie ich sztywność jest znacznie wyższa niż blach do 4 mm grubości, naprężenia ściskające nie powodują pofałdowania. Występujące w takich konstrukcjach spawanych siły wewnętrzne wywołują analogiczne naprężenia jak opisano powyżej tj. rozciągające w spoinie i naprężenia ściskające w dalszej odległości od spoiny. Naprężenia te nie ustąpią, pozostaną w złączy spawanym.

Skurcz objętościowy występuje głównie w przypadku spawania elementów o większych grubościach łączonych blach. Podczas spawania konstrukcji z cieńszych blach skurcz zazwyczaj ogranicza się do odkształceń wynikających ze skurczu podłużnego i poprzecznego. Skurcz podłużny powoduje skrócenie długości spawanych elementów, które wynika ze skrócenia spoiny w kierunku poprzecznym. Skurcz poprzeczny zmienia wymiary konstrukcji w kierunku poprzecznym do przekroju powodując "ściągnięcie do siebie" łączonych elementów. Te siły odkształcające prowadzą do powstania naprężeń rozciągających i ściskających w złączy spawanym.

Największe naprężenia rozciągające występują w kierunkach wzdłużnym i w poprzecznym względem osi spoiny, jednocześnie w zewnętrznych pasach złącza spawanego powstają naprężenia ściskające. Naprężenia działające w kierunku podłużnym spoiny nazywane są naprężeniami wzdłużnymi, natomiast naprężenia działające w kierunku prostopadłym do spoiny nazywane są naprężeniami poprzecznymi. Te naprężenia, a powstające w ich konsekwencji odkształcenia spawalnicze, są wynikiem różnicy w rozszerzalności i sztywności łączonych elementów. Występowanie w konstrukcji naprężeń spawalniczych może znacznie ograniczyć nośność konstrukcji. Naprężenia pochodzące od

skurczu sumują się z naprężeniami pochodzącymi od obciążeń roboczych co w przypadku szczególnie wyężonych konstrukcji prowadzi do uszkodzeń mechanicznych.

2.2 Bazowanie komponentów podczas procesu spawania – przyrządy spawalnicze

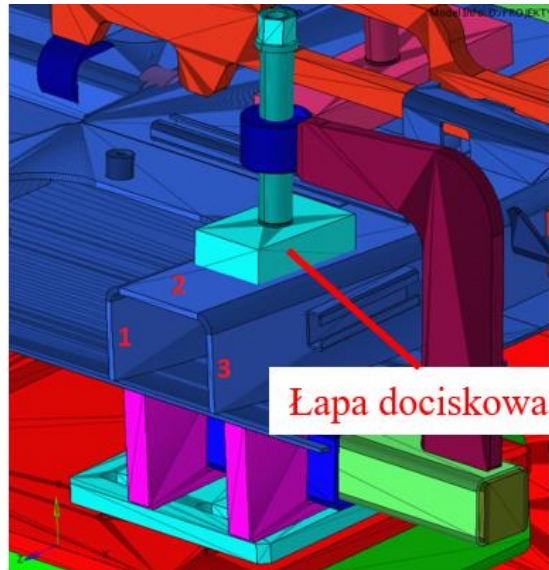
W poprzednim podrozdziale zostały opisane naprężenia ściskające oraz rozciągające powstałe w wyniku odkształcenia termicznego podczas spawania oraz zjawiska skurczu podczas chłodzenia. W celu kontroli nad powstałymi odkształceniami po procesie spawania stosowane są odpowiednie narzędzia ustalające oraz zaciskające. Brak podparcia i prawidłowego zamocowania komponentów prowadzi często do poważnych wad produkcyjnych, czego następstwem jest konieczność wdrożenia dodatkowych operacji mających na celu przywrócenie ich do wymaganego stanu. Wpływa to w znaczący sposób na czas i koszt procesu. Zbyt duże odkształcenia spawalnicze mogą prowadzić nawet do uniemożliwienia właściwego montażu komponentów, ze względu na zbyt duże odchyłki kształtu. Poprawne zaprojektowanie narzędzia podpierającego i odpowiednio ustalającego komponenty podczas procesu spawania prowadzi do minimalizacji negatywnych efektów procesu.

Podział oprzyrządowania wspierającego proces spawania i przeciwdziałającego odkształceniom można podzielić ze względu na:

- narzędzia dociskowe,
- bazy nastawcze,
- rozpory technologiczne,
- wzorniki kształtu.

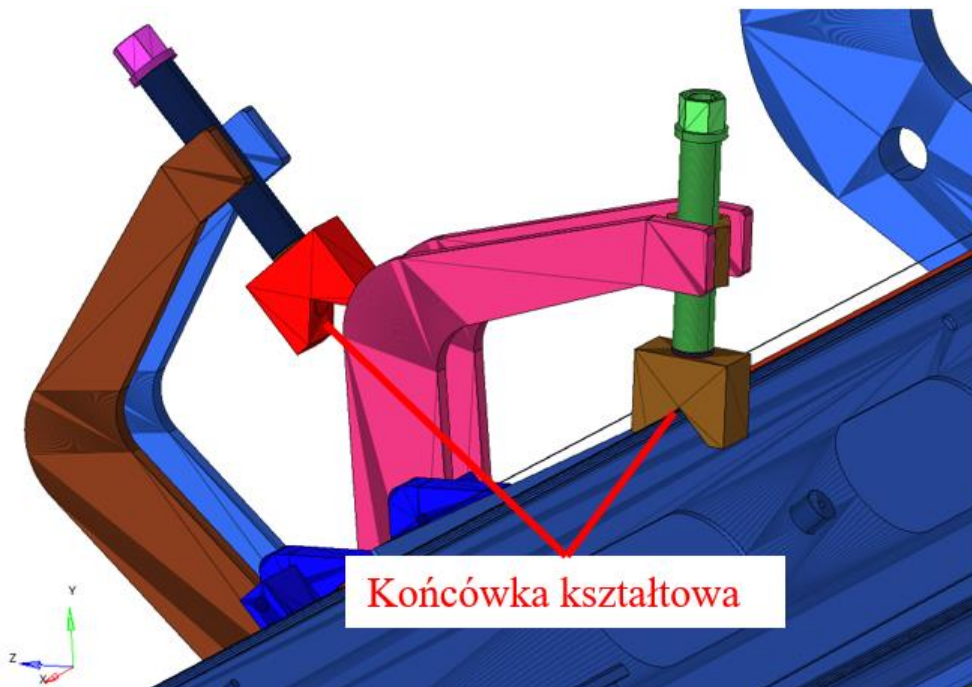
2.2.1 Narzędzia dociskowe

Dociski mają na celu przytwierdzenie komponentu spawanego do spawanej konstrukcji w taki sposób, aby uniemożliwić ich wzajemny ruch i minimalizować odkształcenia podczas spawania oraz po spawaniu. Poniżej na rys. 6 przedstawiono przykład łapy dociskowej. Układ ma na celu docisk komponentu podczas spawania i uniemożliwienie odkształcenia w kierunku normalnym do ściany środkowej (ściana nr. 2) oraz zwiększenie oporu w kierunku poprzecznym dla płaszczyzn 1 oraz 3. W analizowanym przypadku podczas spawania półek ceownika (ścian ceownika 1 oraz 3) do podstawy, wprowadzane ciepło powoduje wydłużenie przy dolnych ich krawędziach, siła pochodząca od ściskania ceownika narzędziem ma przeciwdziałać temu efektowi.



Rys. 6. Przykład łapy dociskowej

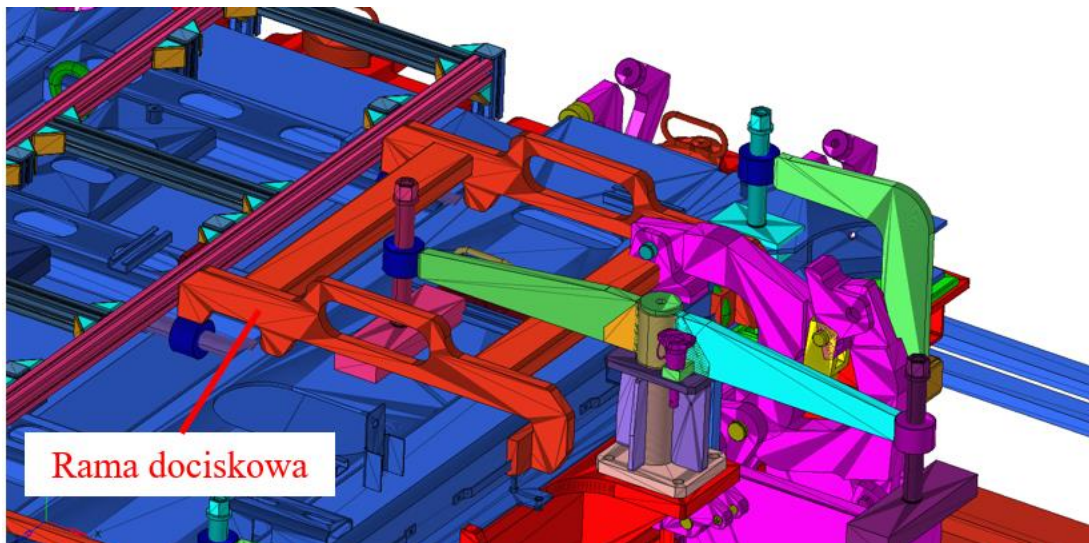
Kolejnym przykładem łapy dociskowej jest rozwiązanie przedstawione poniżej (rys. 7), gdzie siła dociskowa rozłożona została równomiernie w elemencie kontaktowym. Kształt takiego docisku jest dopasowany do powierzchni komponentu. Stosowane są głównie w przypadku, gdy konieczne jest użycie dużej siły dociskowej. Tego rodzaju narzędzia przeciwdziałają lokalnym odkształceniom trwałym, które mogą wystąpić przy punktowym działaniu siły. Odkształcenia trwałe występują najczęściej w przypadku konstrukcji złożonych ze stosunkowo cienkich blach oraz paneli aluminiowych, ich występowanie może być szczególnie częste również z powodu niedostosowania momentu siły z jaką są dokręcane śruby dociskowe.



Rys. 7. Przykład łapy dociskowej z końcówką kształtową

Dodatkowym przykładem możliwości zrealizowania docisku jest jego wywołanie w wielu punktach przy użyciu pojedynczego narzędzia (ramy dociskowej), takie rozwiązanie

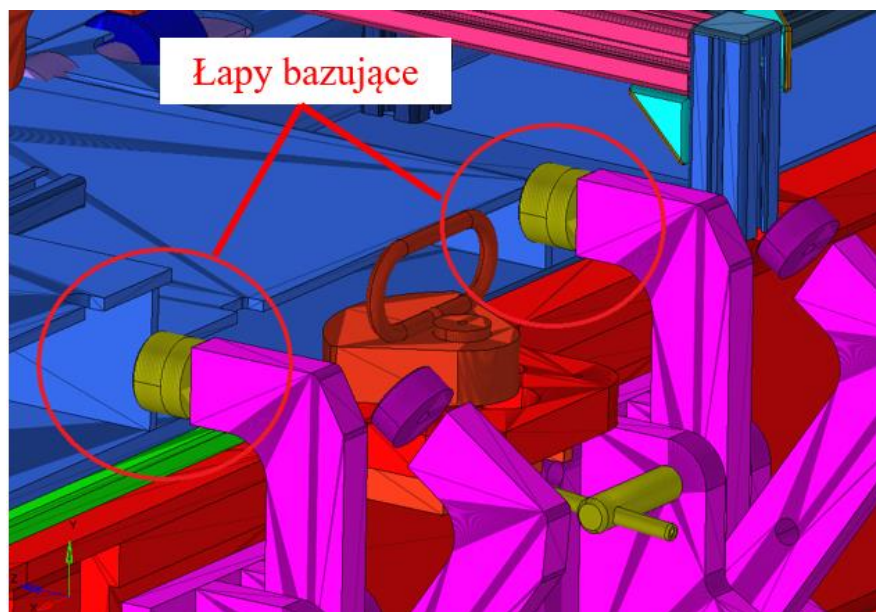
pozwała precyzyjnie uchwycić komponenty, w przypadku, gdy nie ma odpowiedniej przestrzeni do zastosowania pojedynczych docisków. Na rys. 8 znajduje się przykład ramy dociskowej, która oprócz funkcji dociskania, odpowiada również za ustalenie szczelin technologicznych dla operacji spawania.



Rys. 8. Przykład ramy dociskowej

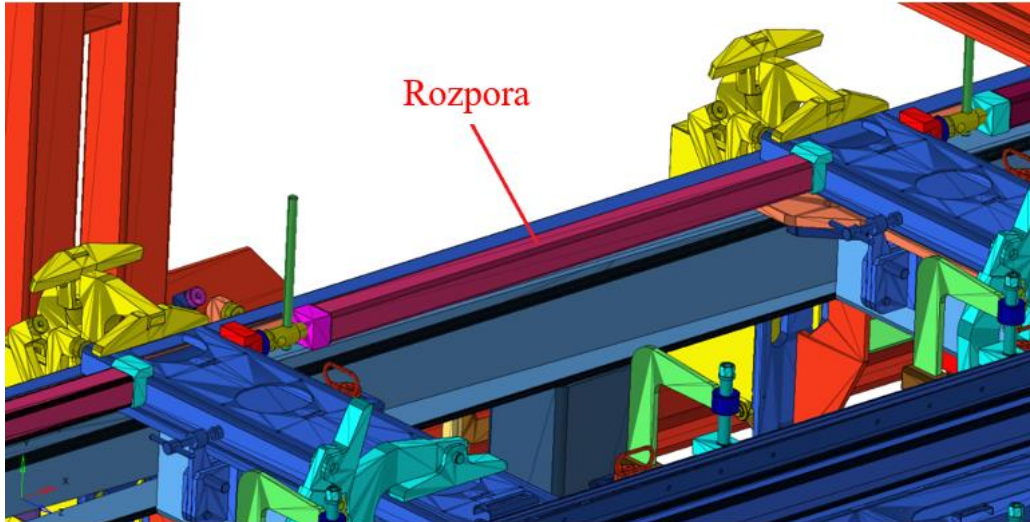
2.2.2 Bazy nastawcze

Oprócz odpowiedniego docisku, równie ważne jest odpowiednie spozycjonowanie części oraz ich bazowanie na dedykowanych punktach odniesienia. Zazwyczaj bazowanie jest jednokierunkowe, ustala komponent w jednej z osi układu współrzędnych. Na rys. 9 zaznaczono łapy bazujące, ustalające spawany komponent w kierunku osi bazy – wzdłuż profilu. Takie rozwiązanie umożliwia zmianę kąta ustawienia bazy w zależności od pozycji trzpienia blokującego ramię ustalające.



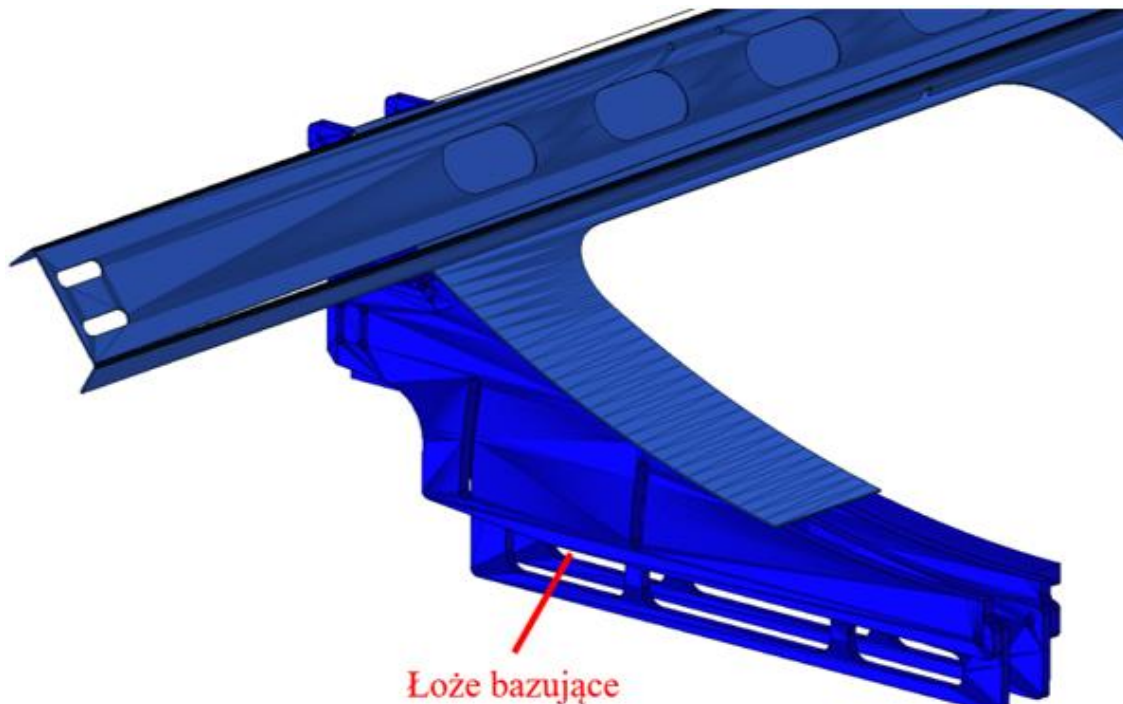
Rys. 9. Przykład łap bazujących

Kolejnym przykładem ustalenia komponentów względem siebie (nie względem łapy bazującej), jest rozpora nastawcza umiejscowiona między dwoma komponentami (rys. 10). Bazowanie opiera się na mechanizmie śruby rzymskiej. Operator kręcąc dźwignią reguluje rozwiercie rozpory, a jej celem jest utrzymanie stałego wymiaru między komponentami i zapobieganie „ściągnięciu” komponentów do wewnątrz.



Rys. 10. Przykład rozpory nastawczej

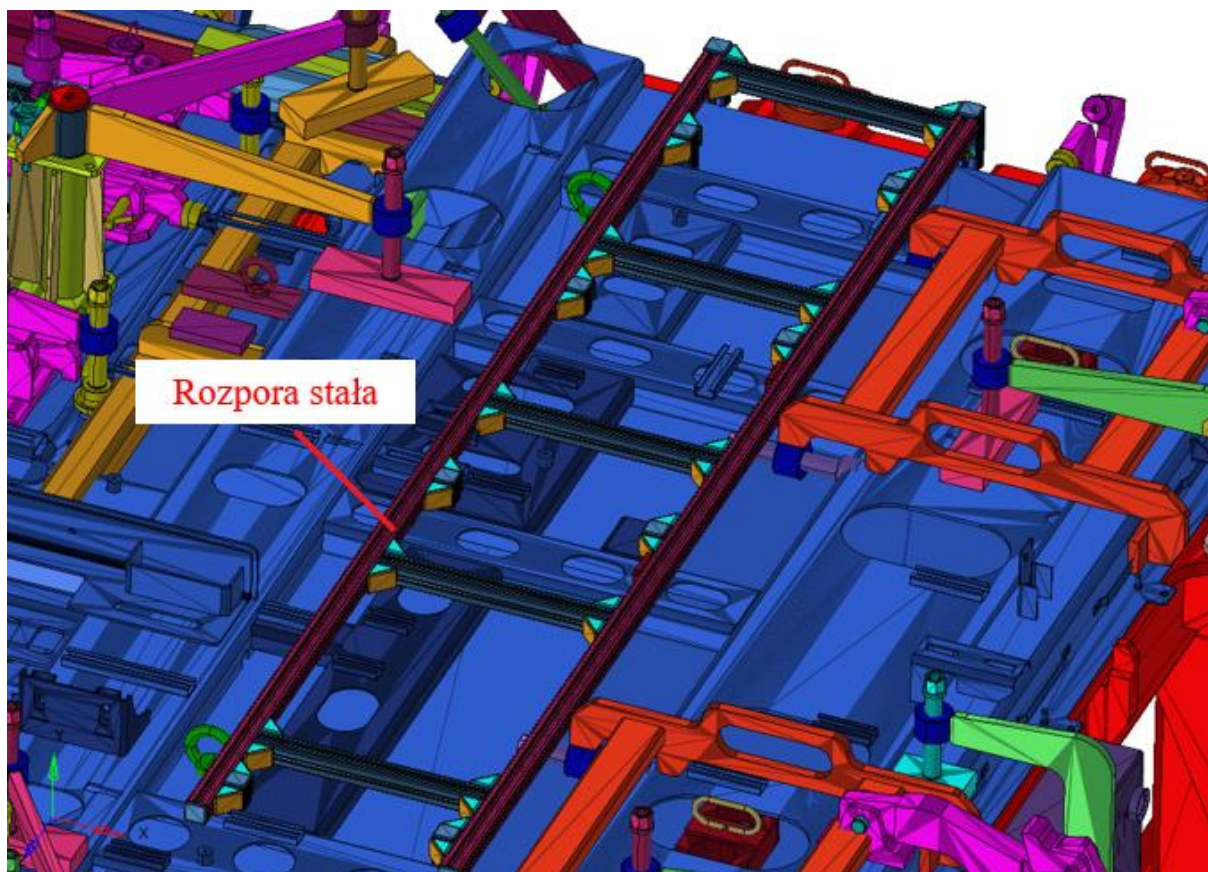
Dodatkowym oprzyrządowaniem bazującym jest łożo podpierające komponenty przedstawione na rys. 11. W przypadku komponentów o nieregularnym kształcie łożo jest dopasowane tak, aby zapewnić poprawne przyleganie komponentu. Zadaniem łoża jest ustalenie pozycji komponentu oraz uniemożliwienie przemieszczania się komponentu w kierunku normalnym do płaszczyzny powierzchni oporowej.



Rys. 11. Przykład łoża bazującego

2.2.3 Rozpory technologiczne

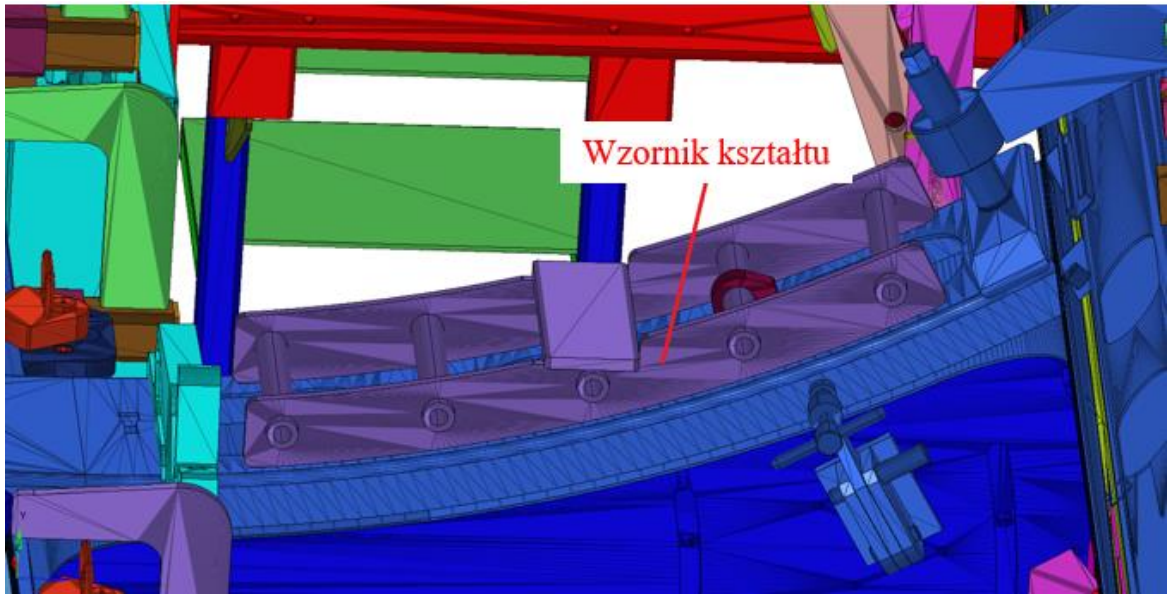
Innym przykładem rozporu technologicznego jest rozpora przedstawiona na rys. 12. Jest to rozpora stała, w odróżnieniu do rozporu regulowanej - nie daje możliwości regulacji szerokości rozstawu bazowanych komponentów. To co wyróżnia to narzędzie to możliwość przesuwania rozporów w kierunku pionowym po szynach zamocowanych po bokach.



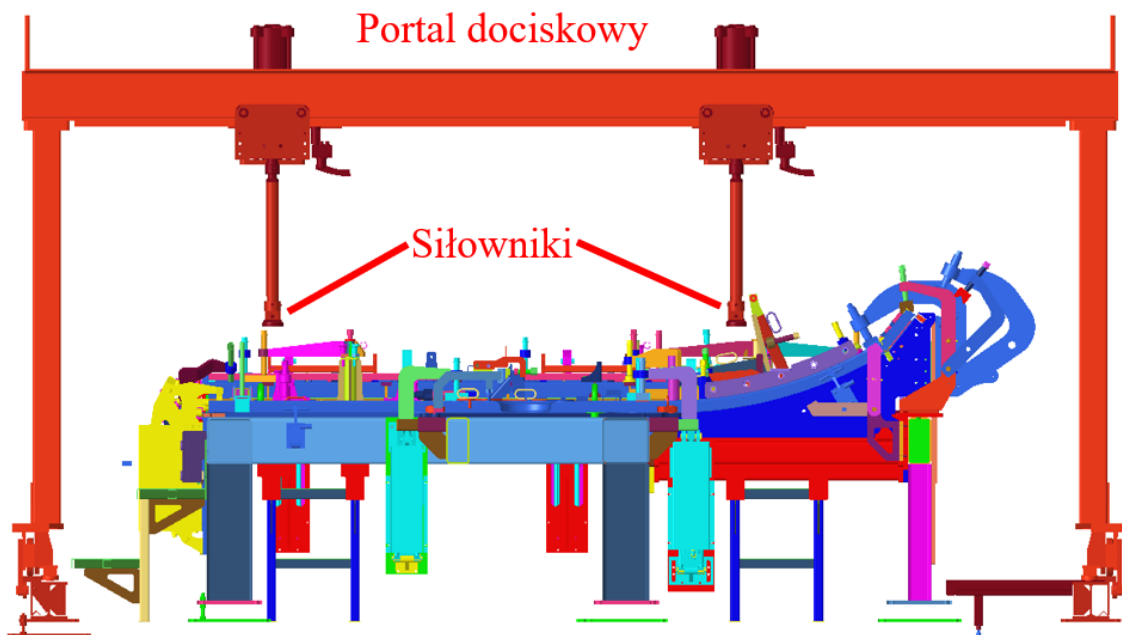
Rys. 12. Rozpora stała

2.2.4 Wzorniki kształtu

Dodatkowym elementem usprawniającym kontrolę i zapobieganie odkształceniom jest wzornik kształtu. W przypadku narzędzia przedstawionego poniżej na rys. 13, dedykowanym kształtem jest promień zaokrąglenia narzędzia, pokrywający się z promieniem zaokrąglenia profilu składowego komponentu. Docisk wzornika realizowany jest poprzez siłownik zamocowany na portalu dociskowym (rys. 14).

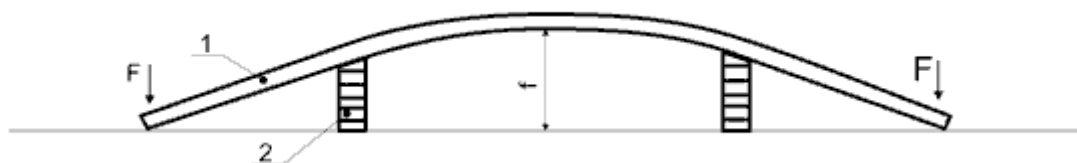


Rys. 13. Przykład wzornika kształtu



Rys. 14. Portal dociskowy

Istotnym zagadnieniem podczas formowania odpowiedniego kształtu finalnego komponentu jest przeciwdziałanie strzałce ugięcia mogącej powstać podczas spawania długich komponentów. Na rys. 15 przedstawiono schemat podpór, w którym w przyrządzie nadano ujemną strzałkę ugięcia w celu wstępnego przegięcia a tym samym kompensacji występujących odkształceń.



Rys. 15. Przykład wstępnego przegięcia komponentu, gdzie: 1 – element spawany, 2 – baza regulowana przyrządu, F – siła dociskająca, f – strzałka ugięcia [44]

2.3 Przeciwdziałanie odkształceniom trwałym

Komponenty spawane, odkształcone trwale można przywrócić do pierwotnego kształtu. Jednym z możliwych sposobów jest prostowanie. Jednak jest to bardzo czasochłonna metoda i nie gwarantuje powodzenia a nawet może skutkować uszkodzeniami a w konsekwencji koniecznością złomowania komponentu.

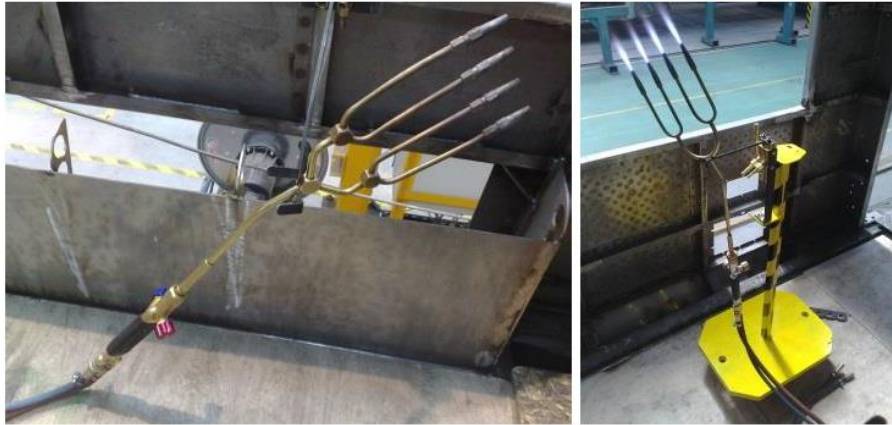
2.3.1 Prostowanie płomieniowe

Blachy i kształtowniki o grubości do 15 mm najczęściej prostowane są za pomocą standardowych palników z jedną dyszą. Materiały o większych grubościach zaleca się prostować przy pomocy palników z dyszami wielopłomieniowymi (rys. 16).



Rys. 16. Przykład palników z jedną dyszą

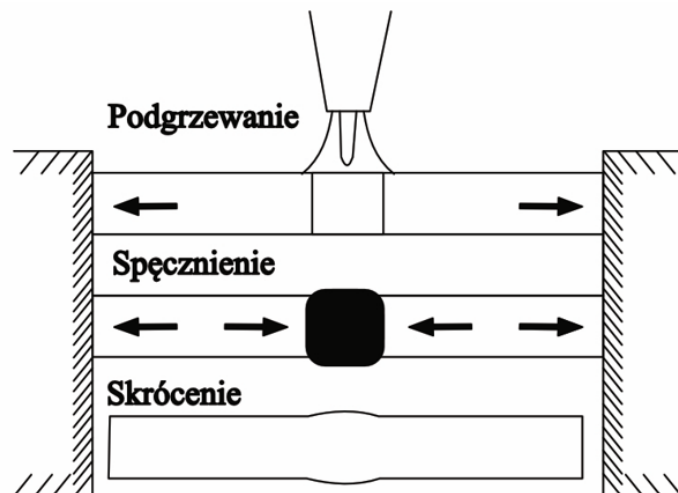
W celu szybszego nagrzewania większych powierzchni materiału stosowane są palniki czterodyszowe (rys. 17). Palniki takiego typu powinny być zawsze używane ze specjalnym uchwytem z zaworem odcinającym. Niezwykle istotna dla palników wielodyszowych jest równa długość wszystkich dysz (końce w jednej linii) – nierówne ułożenie dysz powoduje nierównomierne nagrzewanie co skutkuje nieprawidłowym naprężeniem wygrzewanej powierzchni.



Rys. 17. Przykład palników z dyszą wielopłomieniową

Przy prostowaniu płomieniowym wykorzystywane jest zjawisko zmiany wymiarów elementów w wyniku zmian ich temperatury i związana z tym możliwość generowania naprężeń wewnętrznych. Swobodnie podparty komponent po ogrzaniu rozszerzy się, zaś po swobodnym chłodzeniu wróci do pierwotnych wymiarów. Jeśli natomiast komponent zostanie zamocowany, uniemożliwiając mu swobodne rozszerzanie się, spowodujemy wystąpienie w jego strukturze naprężeń ściskających (rys. 18). Wystąpią wtedy następujące etapy procesu:

- wzrost naprężenia będzie tym wyższy, im wyższa będzie temperatura nagrzewania,
- gdy naprężenia ściskające przekroczą granicę plastyczności materiału, w materiale pojawią się trwałe odkształcenia plastyczne,
- po przerwaniu grzania, komponent zaczyna stygnąć, lecz odkształcenie trwałe po ochłodzeniu pozostaje.

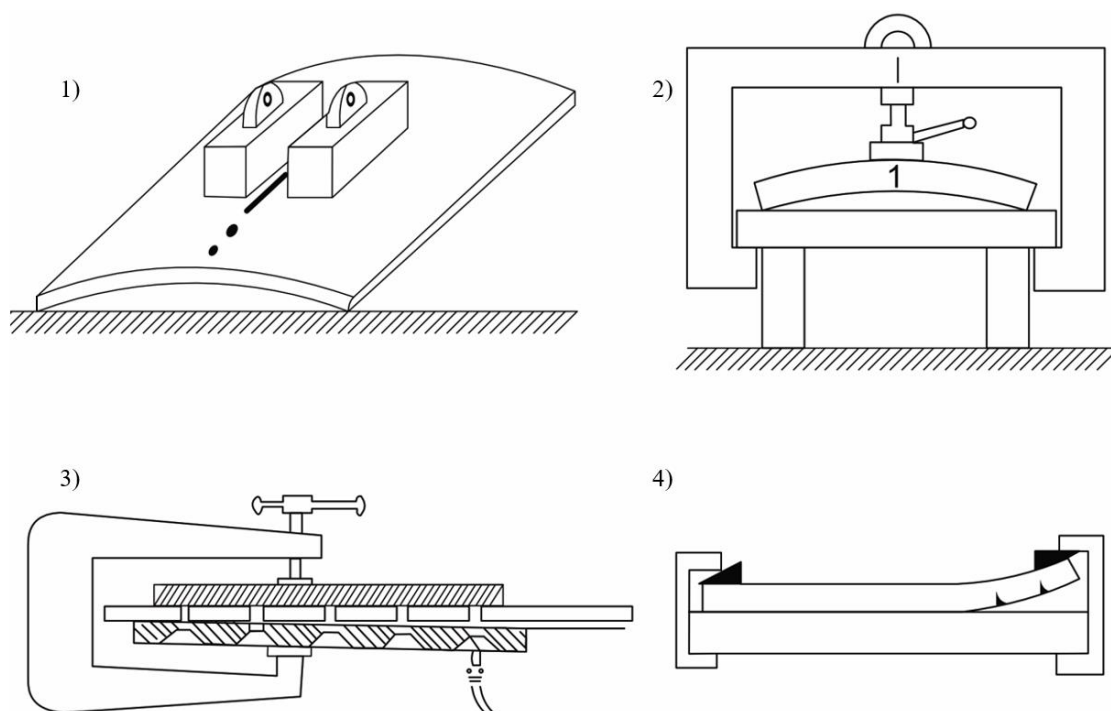


Rys. 18. Schemat procesu prostowania płomieniowego przy zamocowaniu

Podczas prostowania płomieniowego, płomień gazowy używany jest jako źródło ciepła do nagrzewania ściśle określonych obszarów w obrębie prostowanego komponentu do temperatury, w której osiągną one stan plastyczności. W procesie tym wyróżnić można następujące etapy:

- prostowany obszar należy nagrzewać miejscowo oraz bardzo szybko, aby ograniczyć przechodzenie ciepła w sąsiednie obszary,
- nagrzewane miejsce rozszerza się, lecz rozszerzanie to jest blokowane przez otaczający go metal o niższej temperaturze. Powoduje to powstanie spęczeń, jak w omawianym powyżej przykładzie,
- podczas stygnięcia obszar komponentu, który uległ spęczeniu kurczy się bardziej niż się rozszerzył podczas nagrzewania i w ten sposób zdeformowany komponent ulega prostowaniu,
- pełny efekt procesu prostowania jest widoczny, gdy materiał ostygnie do temperatury otoczenia,
- podczas procesu prostowania płomieniowego należy ograniczyć możliwość swobodnego cieplnego rozszerzania się nagrzewanego komponentu.

W wielu przypadkach ograniczenie rozszerzania się komponentu przez jego chłodniejsze (nie nagrzewane) obszary nie jest wystarczające. W takich przypadkach stosowane są urządzenia pomocnicze, których dobór zależy od grubości materiału, kształtu elementu itp. Na rys. 19 przedstawiono kilka przykładów urządzeń służących do ograniczania rozszerzania się metalu, jak obciążniki, klamry, rozpieraki, blachy perforowane.

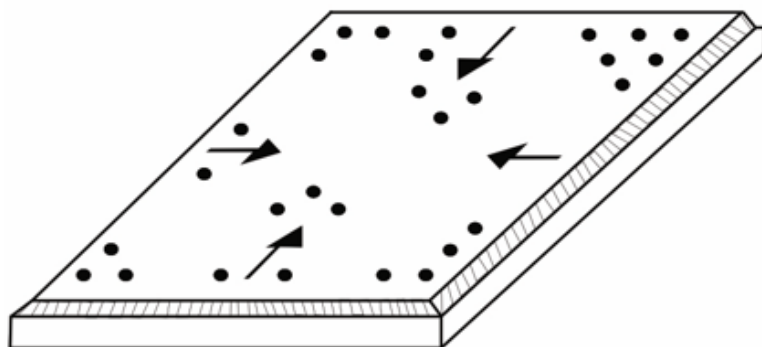


Rys. 19. Oprzyrządowanie pomocnicze, gdzie: 1) – obciążniki, 2) – prasa, 3), 4) – klamra

2.3.2 Sposób nagrzewania

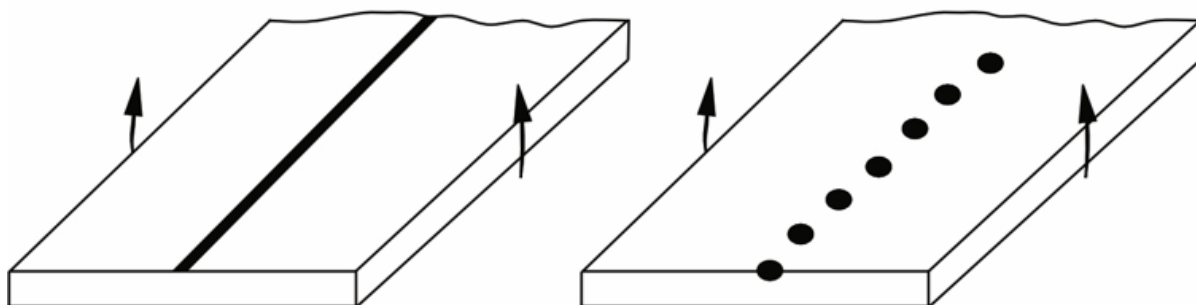
Na finalny efekt operacji prostowania kluczowy wpływ ma sposób w jaki komponent jest nagrzewany. W zależności od powstałych wad produkcyjnych powinien zostać dobrany proces odpowiednio dla danego przypadku.

Nagrzewanie punktowe stosuje się do usuwania wybrzuszeń na blachach jak również deformacji na wałach i rurach. Aby rezultaty prostowania były jak najlepsze punkty powinny mieć jak najmniejsze rozmiary (rys. 20).



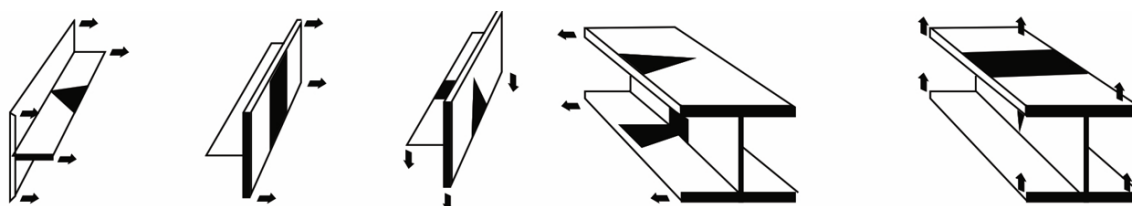
Rys. 20. Przykład nagrzewania punktowego

Nagrzewanie liniowe stosowane jest do usuwania odkształceń kątowych w złączach ze spoinami pachwinowymi lub czołowymi. Proces nagrzewania może przebiegać w sposób ciągły lub przerywany (punktowo wzdłuż jednej linii) (rys. 21).



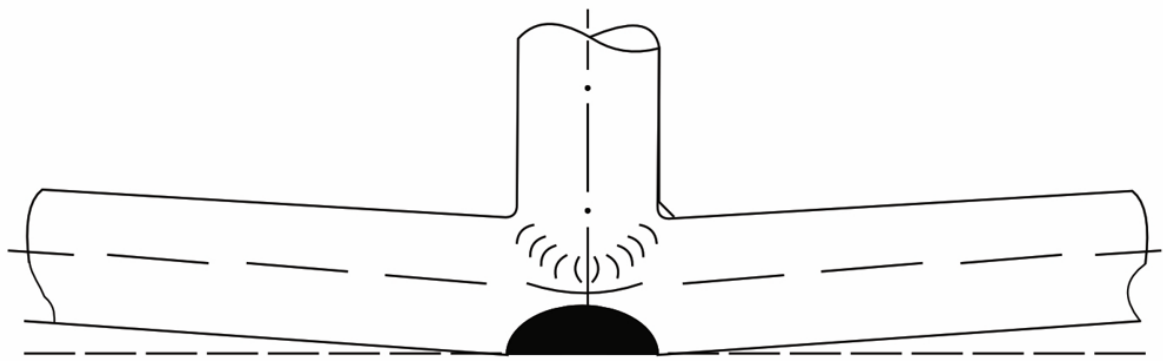
Rys. 21. Przykład nagrzewania liniowego

Nagrzewanie klinowe stosowane jest wtedy, gdy wymagany jest szczególnie silny efekt prostowania np. przy prostowaniu odkształconych belek. Nagrzewanie prowadzi się rozpoczynając od wierzchołka klina w kierunku jego podstawy. Kliny powinny być długie i wąskie (rys. 22).



Rys. 22. Przykład nagrzewania klinowego

Nagrzewanie owalne jest używane w przypadku procesu prostowania konstrukcji z rur, które uległy deformacji. W takim przypadku należy podgrzać obszar leżący w osi podłużnej rury, po przeciwnej stronie złącza. Prostując element, należy rozpoczynać nagrzewanie od zewnątrz deformacji i kierować się ku środkowi (rys. 23).

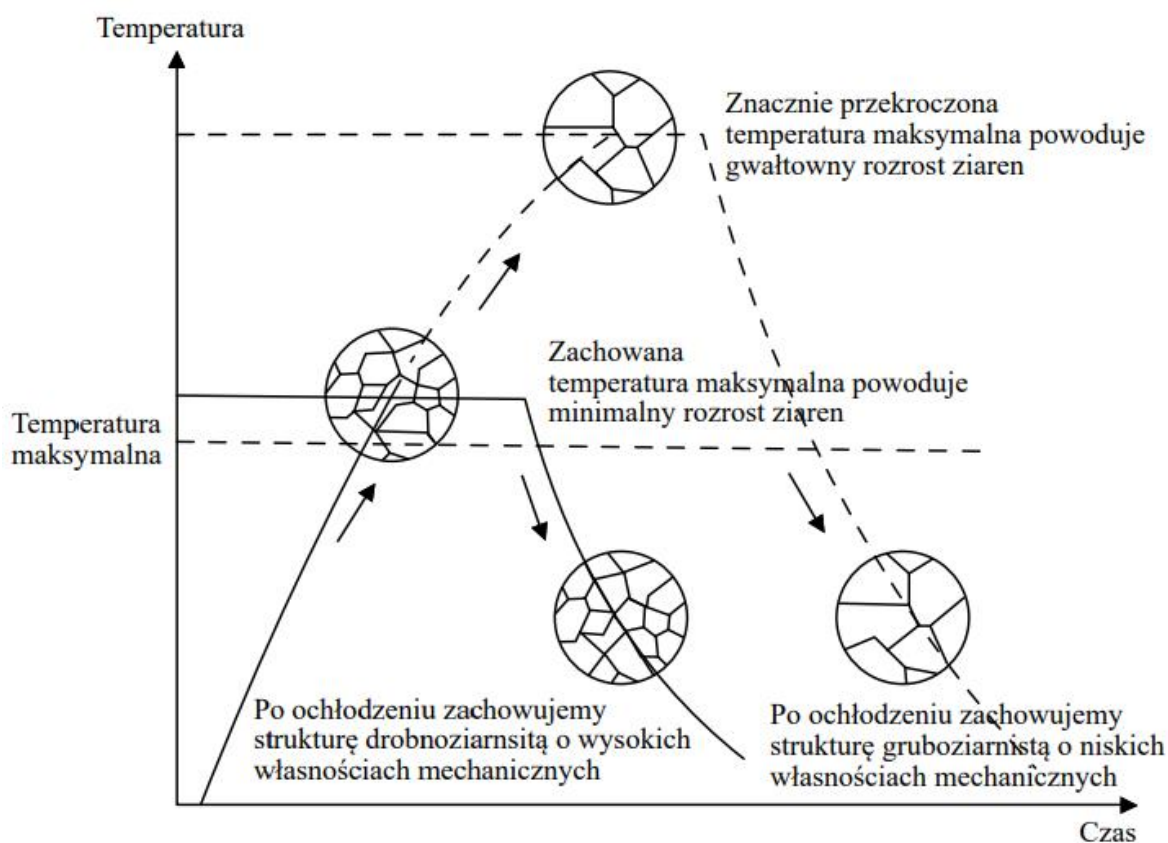


Rys. 23. Przykład nagrzewania owalnego

2.3.3 Wpływ temperatury oraz czasu nagrzewania na strukturę oraz własności materiału

Własności mechaniczne stali w głównej mierze zależą od jej struktury (rys. 24), stale o wysokich własnościach mechanicznych charakteryzują się drobnoziarnistą strukturą. Większość stali stosowanych w przemyśle kolejowym jest stalami drobnoziarnistymi, których struktura jest kształtowana podczas odpowiednio dobranego procesu hutniczego. Stal w odpowiedniej temperaturze poddawana jest walcowaniu oraz kontrolowanemu chłodzeniu. Podczas procesu prostowania płomieniowego konieczność nagrzewania negatywnie wpływa na strukturę stali powodując rozrost ziaren co przekłada się na obniżenie własności mechanicznych. Aby prostowanie było jak najskuteczniejsze a spadek własności mechanicznych był jak najmniejszy należy przestrzegać kilku wytycznych:

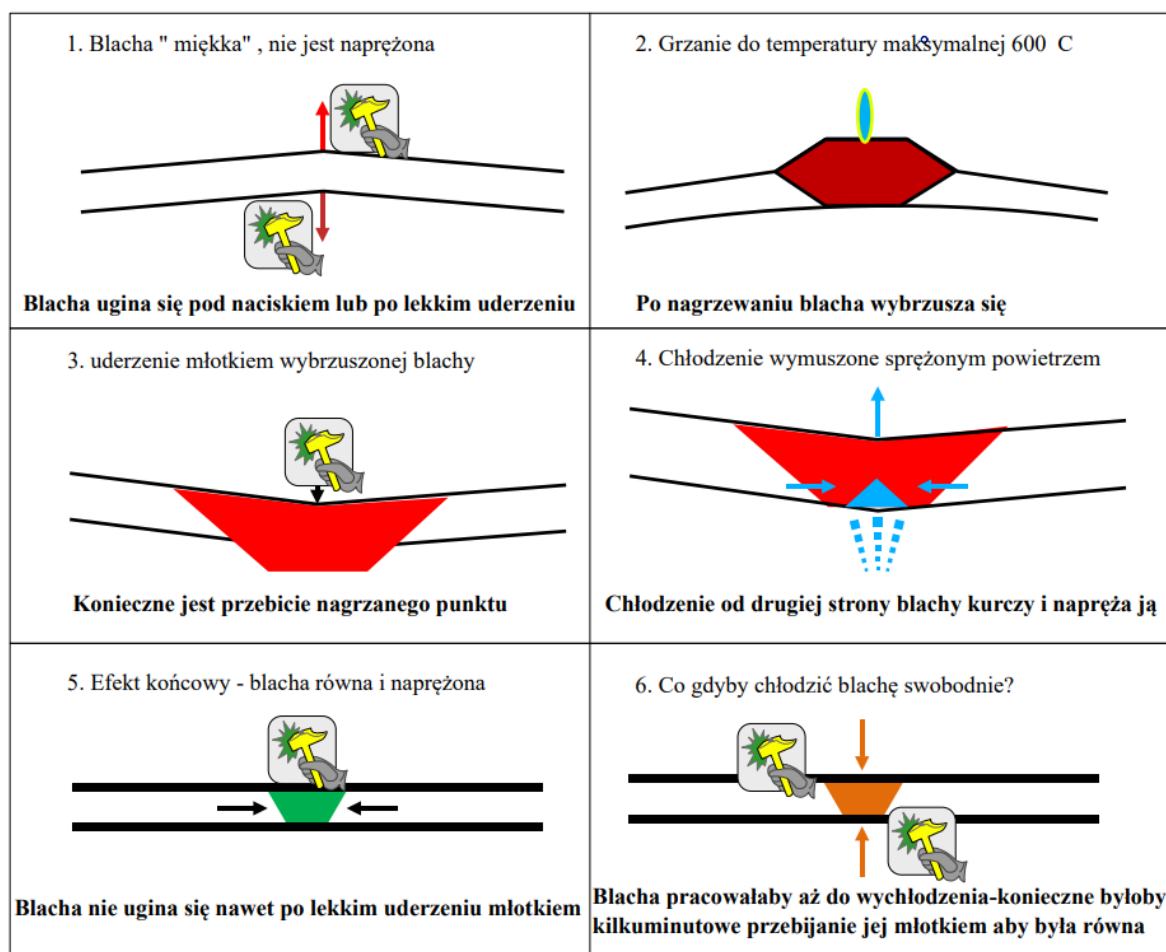
- nagrzewać do jak najwyższej temperatury, nie przekraczając przy tym temperatury maksymalnej dla danego gatunku materiału,
- przekroczenie temperatury maksymalnej powoduje gwałtowny rozrost ziaren struktury co wiąże się ze znacznym spadkiem własności mechanicznych,
- materiał podgrzany do niższej temperatury niż maksymalna możliwa, rozszerza się i kurczy w znacznie mniejszym zakresie, co może być niewystarczające, aby osiągnąć wymagany efekt. W takim wypadku konieczne będzie kolejne podgrzanie materiału w innym miejscu,
- należy unikać wielokrotnego nagrzewania materiału w tym samym miejscu, wraz z kolejnymi operacjami nagrzewania materiał rozszerza się i kurczy w mniejszym zakresie, dodatkowo następuje dalszy rozrost ziaren i pogorszenie się własności mechanicznych.



Rys. 24. Efekt rozrostu ziaren podczas procesu grzania

2.3.4 Przykład pracy materiału podczas nagrzewania i chłodzenia

Na rys. 25 przedstawiono schemat procesu prostowania z ingerencją mechaniczną, gdzie blacha zostaje podgrzana, więc jej plastyczność i formowalność ulega zwiększeniu. Przy pomocy młotka wybruszona blacha w punkcie podgrzania jest przebijana i dochodzi do jej przegięcia w odwrotną stronę. Aby wyprostować blachę należy ją schłodzić sprężonym powietrzem. Po tej operacji blacha ma równą oraz naprężoną powierzchnię, która nie odkształca się pod wpływem oddziaływania siły zewnętrznej podczas użytkowania.



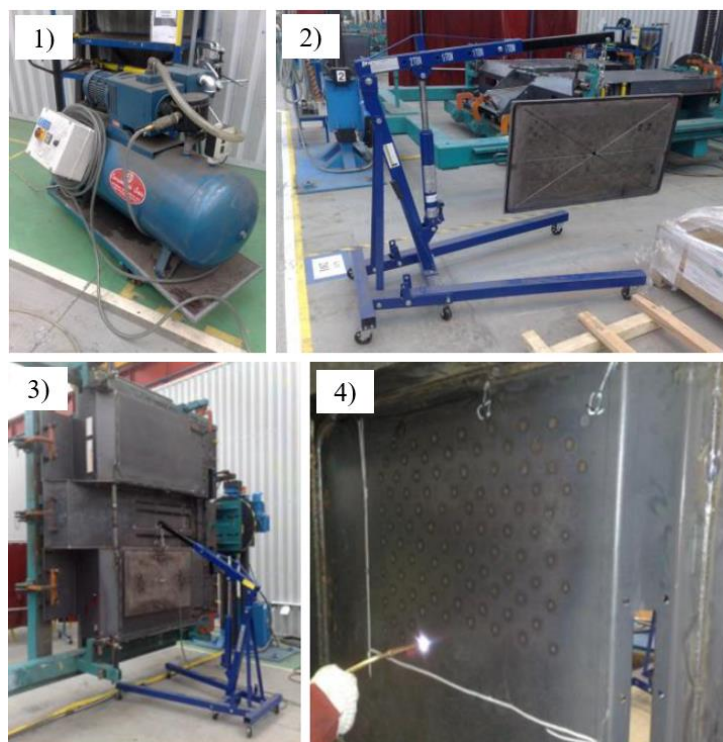
Rys. 25. Schemat obrazujący zachowanie komponentów podczas procesu prostowania

2.3.5 Prostowanie poszyc

W przypadku dużych odkształceń trwałych komponentów wielkogabarytowych, takich jak poszycia pojazdów, należy zastosować specjalne metody prostowania. Najczęściej stosowanymi metodami są:

- prostowanie z wykorzystaniem płyt próżniowych,
- prostowanie z wykorzystaniem elektromagnesu i płyt ażurowych.

Prostowanie i naprężanie poszycia za pomocą płyt próżniowych polega na wykorzystaniu zjawiska próżni wytworzonej przez pompę próżniową przyciągającą prostowaną powierzchnię poszycia do płyty ze specjalnie wyżłobionymi rowkami (rys. 26). Z przeciwnej strony prostowana powierzchnia jest nagrzewana przy użyciu palnika. Zaletą tej metody, w porównaniu do prostowania z wykorzystaniem elektromagnesu, są tańsze urządzenia (płyty i pompa próżniowa) oraz brak konieczności przerywania pracy na studzenie elektromagnesu, jak również brak oddziaływania pola elektromagnetycznego na pracowników. Wadą tej metody jest konieczność regularnej kontroli stanu uszczelek płyt próżniowych oraz ograniczenie strefy grzania tak aby nie uszkodzić ich termicznie. Przed rozpoczęciem procesu prostowania należy wyznaczyć strefę grzania z dala od uszczelek i ściśle jej przestrzegać. Ponadto nagrzanie poza wyznaczonym obszarem może skutkować zwiększeniem się deformacji.



Rys. 26. Prostowanie przy użyciu płyt próżniowych, gdzie: 1) – kompresor, 2) – płyta próżniowa, 3) – prostowany komponent , 4) – proces grzania

Prostowanie i naprężanie elementów stalowych konstrukcji przy użyciu elektromagnesów polega na wytworzeniu pola magnetycznego poprzez umieszczenie płyty dociskowej elektromagnesu na stronie zewnętrznej prostowanej powierzchni poszycia. Z przeciwnej strony prostowanej powierzchni umieszczana jest stalowa płyta z otworami, przez które nagrzewana jest struktura poszycia przy użyciu palnika (rys. 27). Dociśnięcie wypukłej lub wklęsłej blachy poszycia do płyty elektromagnesu z jednoczesnym jej punktowym podgrzaniem do odpowiedniej temperatury powoduje jej radialne spękanie w płaszczyźnie. Następnie schładzanie się blachy powoduje „ściągnięcie” się otoczenia wokół nagranych punktów i tym samym wyprostowanie i naprężenie blachy.



Rys. 27. Nagrzewanie struktury przy użyciu płyty ażurowej

2.3.6 Prostowanie na zimno przy użyciu młotków

Prostowanie płomieniowe jest zawsze priorytetowe względem prostowania na zimno, które dopuszczalne jest jedynie wtedy, gdy nie prowadzi do uszkodzenia konstrukcji i obszaru złącza spawanego. Prostowanie na zimno młotkiem może powodować lokalne

uszkodzenia materiału które nie są widoczne gołym okiem. Do prostowania na zimno przy pomocy młotka nie powinno się używać młotków stalowych ze względu na ryzyko uszkodzenia prostowanej powierzchni. Zaleca się stosowanie młotków z teflonową końcówką, których obrzeża zabezpieczone są powierzchnią z tworzywa sztucznego (rys. 28). Powodują one znacznie mniejsze uszkodzenia prostowanych powierzchni niż młotki stalowe, z tego powodu ich użycie jest bezpieczniejsze. Dozwolone jest bezpośrednie uderzanie tego typu młotkiem w prostowaną powierzchnię bez konieczności używania gładzika. Gładziki to młotki ze specjalnie wyprofilowaną głową, przykładane bezpośrednio do prostowanego materiału. Ze względu na ich kształt (duża, równa powierzchnia oraz zaokrąglone obrzeża) zapobiegają one uszkodzeniu materiału. Przed rozpoczęciem procesu prostowania należy upewnić się, że powierzchnia przykładana do materiału nie jest uszkodzona. Wszelkie ostre krawędzie mogą spowodować uszkodzenia prostowanej powierzchni (rys. 28).

Podczas prostowania za pomocą młotków należy stosować się do następujących zasad:

- zabrania się uderzania w bezpośrednim sąsiedztwie żeber oraz wzmocnień,
- zabrania się uderzania w bezpośrednim sąsiedztwie promieni gięcia,
- zabrania się uderzania w bezpośrednim sąsiedztwie spoin,
- zabrania się uderzania młotkiem stalowym bezpośrednio w prostowaną powierzchnię, należy zastosować gładzik,
- dozwolone jest uderzanie bezpośrednio w materiał za pomocą młotków blacharskich,
- dozwolone jest uderzanie bezpośrednio w materiał za pomocą młotków teflonowych,
- zabrania się używania młotków z luźną głownią,
- zabrania się używania młotków oraz gładzików z uszkodzoną powierzchnią.



Rys. 28. Przykład młotków z teflonową końcówką oraz gładzika

2.3.7 Prostowanie na zimno na prasie

Dodatkową metodą prostowania na zimno, jest proces prostowania wspomagany prasami hydraulicznymi poprzez wywarcie nacisku stempla a następnie odkształcenie plastyczne prostowanego komponentu. Metoda ta wykorzystywana jest głównie podczas naprawy konstrukcji o wysokiej sztywności takich jak belki czy ramy. W celu prawidłowego i stabilnego ustawienia komponentów na prasie wymagane jest zastosowanie dedykowanych narzędzi oraz podpór. Przykłady oprzyrządowania stosowanego podczas prostowania przy użyciu prasy przedstawiono na rys. 29. Stosowane są również narzędzia, które bezpośrednio podkłada się pod stempel prasy w celu uzyskania dedykowanego kształtu. Prostowanie na

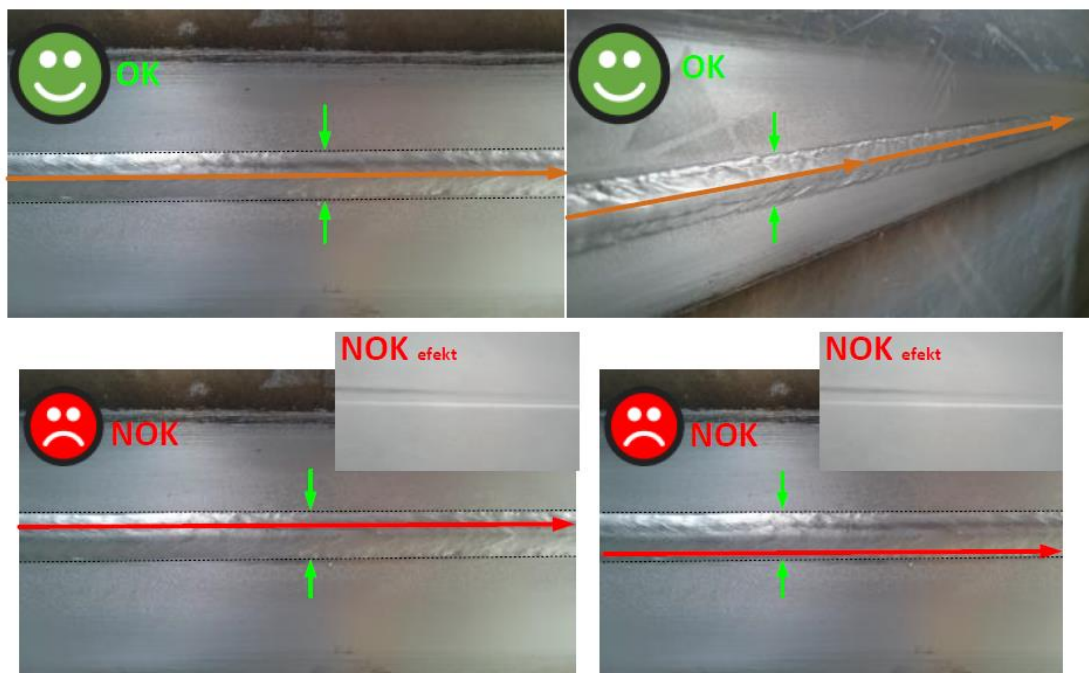
pracie niesie za sobą duże ryzyko uszkodzenia, siła wywierana przez stempel jest stosunkowo duża i łatwo może spowodować wgniecenia w prostowanej powierzchni.



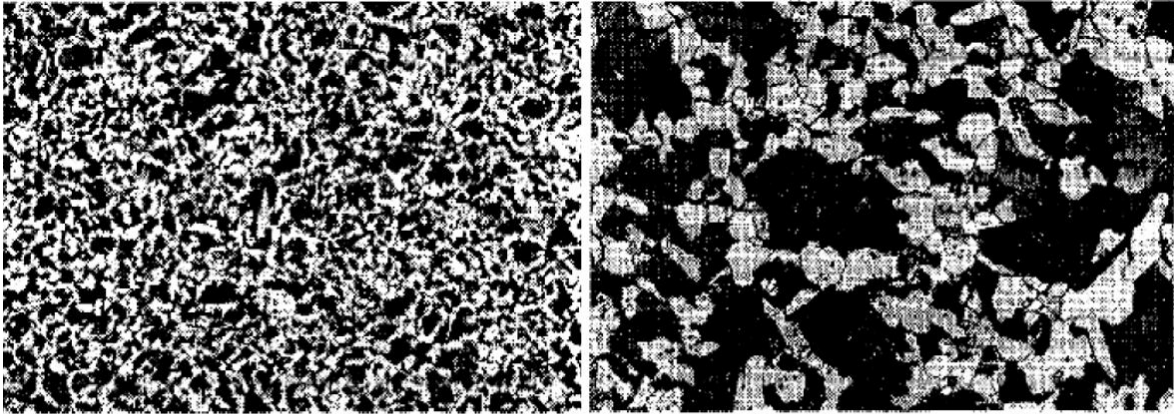
Rys. 29. Przykłady oprzyrządowania stosowanego podczas prostowania przy użyciu prasy

2.3.8 Uszkodzenia trwale występujące po procesie prostowania

Wszelkie operacje prostowania oraz naprawy wykonywane po procesie spawania niosą za sobą wysokie ryzyko uszkodzenia komponentów, dlatego bardzo ważne jest, aby ograniczyć je do minimum. Nieprawidłowo przeprowadzony proces naprawy skutkuje wadami, które często już nie mogą podlegać dalszym operacjom naprawczym powodując w konsekwencji złomowanie całych komponentów. Straty finansowe poniesione z tego tytułu są wyjątkowo obciążające z racji kosztów poniesionych na elementy składowe konstrukcji jak również czas produkcji oraz naprawy. Najczęściej spotykane wady są związane z przegrzaniem materiału spowodowanym brakiem kontroli temperatury podczas grzania oraz nieprawidłowym prowadzeniem palnika. Skutkuje to dodatkowymi wybrzuszeniami w obszarze spoiny oraz nadmiernym rozrostem ziaren w strukturze materiału (rys.30, rys. 31). Niekontrolowany rozrost ziaren prowadzi do znacznego obniżenia własności mechanicznych (rys. 31) oraz spadku twardości.



Rys. 30. Operacja wykonana poprawnie oraz źle



Powiększenie x100
Stal drobnoziarnista

Wysokie własności mechaniczne

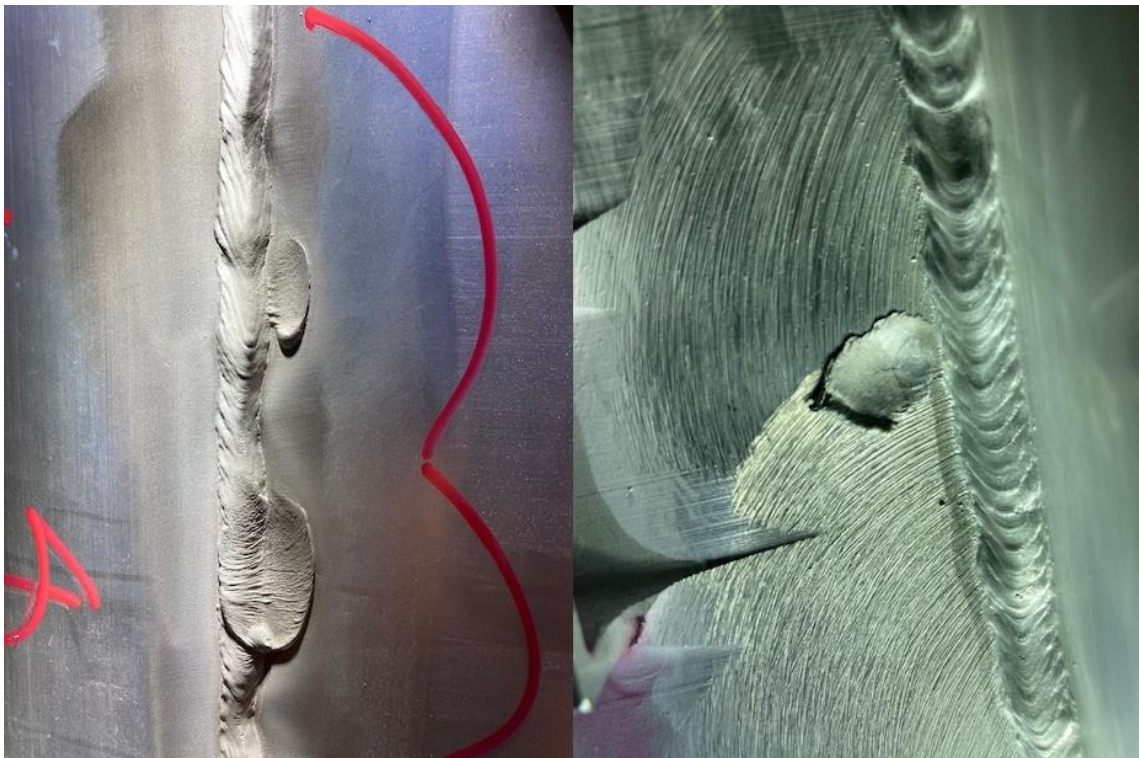
Powiększenie x100

Przegrzana stal – rozrośnięte ziarna

Niskie własności mechaniczne

Rys. 31. Rozrost ziaren spowodowany przegrzaniem materiału

W szczególnych przypadkach, w których zaniedbano wszelkie standardy dotyczące grzania prostowanych komponentów dochodzi do wydmuchania lica spoiny. Wada powstaje, gdy operator stopi lico spoiny poprzez zbyt długi okres miejscowego grzania, które następnie ulegnie wydmuchaniu pod wpływem wypływających gazów z palnika (rys. 32). Jest to szczególnie rażący przykład zaniedbania łączący zarazem brak kontroli temperatury jak i nadmierny wpływ gazów z palnika.



Rys. 32. Przykład wydmuchania lica spoiny spowodowany przegrzaniem materiału

Kolejnym przykładem błędu podczas procesu prostowania jest przegrzanie obszaru naprawy (rys. 33). Jest to szczególnie niebezpieczne zjawisko, ponieważ trudno je wykryć podczas gdy nie wystąpią wyżej opisane wyraźnie widoczne wady. Charakterystyczną cechą przegrzanego obszaru jest odbarwienie materiału, jednak nie zawsze ono występuje.

Przeegrzany komponent może być w takim przypadku nieświadomie dopuszczony do dalszego procesu mimo znacznie obniżonych właściwości mechanicznych w obrębie spoin.



Rys. 33. Przeegrzanie materiału

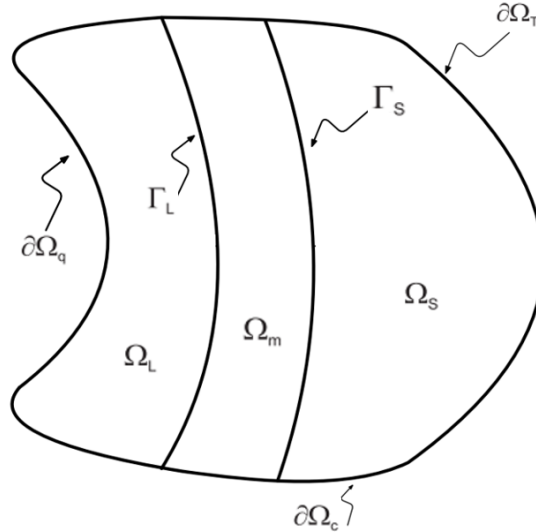
3 Modelowanie procesu spawania w metodzie elementów skończonych

Metoda elementów skończonych (MES) jest obecnie szeroko stosowana przy projektowaniu nowych produktów, jednak jej zastosowanie przy definiowaniu procesów produkcyjnych w dalszym ciągu nie jest powszechne. Głównym celem stosowania metody elementów skończonych w praktyce produkcyjnej jest poprawa jakości finalnego produktu oraz poznanie wpływu różnych parametrów na stabilność produkcji w wyniku symulacji numerycznej procesu, która pozwala na ocenę wyniku jeszcze przed przeprowadzeniem rzeczywistych testów. Analiza procesu spawania jest bardzo skomplikowanym zagadnieniem z uwagi na fizykalną złożoność termo-mechanicznego problemu. Podczas procesu spawania w jeziorku spawalniczym zachodzą zjawiska konwekcji, co wpływa na przewodzenie ciepła w strukturze. Po usunięciu źródła ciepła, metal krzepnie. Przy zmianie stanu skupienia zachodzą zmiany w strukturze, które powodują zmianę własności mechanicznych. Dodatkowo ogrzewanie i chłodzenie powoduje miejscowe zmiany objętości a w efekcie trwale odkształcenia oraz naprężenia szczątkowe. Tak opisany problem uwzględnia rozszerzalność cieplną i właściwości materiałowe zależne od temperatury. Ciepło generowane przez odkształcenie plastyczne jest znacznie mniejsze niż ciepło wprowadzane przez łuk spawalniczy. Dlatego analizę termiczną można przeprowadzić niezależnie od analizy mechanicznej. Podejście to uwzględnia ciepło utajone przemian przy zmiany fazy ciekłej na stałą oraz zależności temperaturowe pojemności cieplnej i przewodności, ale nie uwzględnia efektów przemian w stanie stałym. Na rys. 34 przedstawiono schemat procesu.



Rys. 34. Sprzężenie termo-mechaniczne

Podczas przemian fazowych uwalniana lub pochłaniana jest znaczna ilość ciepła utajonego. Powoduje to silną nieliniowość w funkcji entalpii. W celu poprawnego zamodelowania takiego zjawiska, wyróżnia się poszczególne podobszary jednofazowe uwzględniane podczas całkowania po elementach skończonych osadzonych we froncie krzepnięcia. Poszczególne fazy są integrowane oddzielnie w celu uchwycenia ostrych różnic właściwości materiału pomiędzy nimi (rys. 35). Całka nieciągła pozwala na uniknięcie regularyzacji zjawiska, umożliwiając dokładny opis w postaci dyskretnego nieliniowego równania modelu, które jest rozwiązywane przy użyciu pełnego schematu Newtona-Raphsona wraz z przeszukiwaniem liniowym.



Rys. 35. Definicja problemu termicznego

Zakładając brak ściśliwości, pomijalną lepkość i rozproszenie ciepła, liniową zależność strumienia ciepła od gradientu temperatury (prawo Fouriera) oraz brak efektu pływnięcia podczas procesu krzepnięcia, bilans energetyczny dla każdego podobszaru Ω_i przedstawia równanie:

$$\rho \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial t} - \nabla \cdot (\kappa \nabla T) = q \quad \forall (\mathbf{x}, t) \in \Omega_i \quad (3.1)$$

gdzie:

T – temperatura,

H – entalpia (na jednostkę objętości),

K – przewodność cieplna materiału (przyjęta jako izotropowa),

$q = q(\mathbf{x}, t)$ – doprowadzone ciepłem objętościowym spawania.

Równanie (3.1) zostaje uzupełnione warunkiem początkowym:

$$T = T_0 \quad \forall \mathbf{x} \in \Omega_i, \quad t = t_0 \quad (3.2)$$

oraz zewnętrznymi warunkami brzegowymi na $\partial\Omega$:

$$T = \bar{T} \quad \text{w } \partial\Omega_T \quad (3.3)$$

$$-\kappa \nabla T \cdot \mathbf{n} = \bar{q} \quad \text{w } \partial\Omega_q \quad (3.4)$$

$$-\kappa \nabla T \cdot \mathbf{n} = h_{env}(T - T_{env}) \quad \text{w } \partial\Omega_c \quad (3.5)$$

gdzie:

$\partial\Omega_T, \partial\Omega_q, \partial\Omega_c$ - nienakładające się części granicy ciała $\partial\Omega$, z określoną odpowiednio temperaturą, przewodnością cieplną oraz konwekcją,

\bar{T}, \bar{q} - założone pola temperatury i strumienia ciepła,

T_{env} - temperatura otoczenia,
 h_{env} - współczynnik wpływu temperatury otoczenia,
 \mathbf{n} – wektor jednostkowy prostopadły do $\partial\Omega$.

Ponadto na granicach Γ muszą być spełnione następujące warunki ciągłości:

$$T = T_\Gamma \quad (3.6)$$

$$\langle \mathcal{H}u(\boldsymbol{\eta}) + \kappa \nabla T \cdot \boldsymbol{\eta} \rangle = 0 \quad (3.7)$$

gdzie:

T_Γ - wartość stała równa temperaturze topnienia w przypadku krzepnięcia izotermicznego, a w przeciwnym przypadku, temperaturze solidusu, albo likwidusu.

$\langle * \rangle$ – oznacza skok wielkości (*) podczas przechodzenia przez interfejs Γ , który porusza się z prędkością u w kierunku określonym przez wektor jednostkowy $\boldsymbol{\eta}$,

Drugie równanie określa bilans skoku energii na granicy Γ . Aby wyrugować T jako jedyną zmienną pierwotną, entalpię definiuje się zgodnie z poniższym wzorem:

$$\mathcal{H}(T) = \int_{T_{ref}}^T c d\tau + \mathcal{L}f_l \quad (3.8)$$

gdzie:

ρc – jednostkowa pojemność cieplna,

$\rho \mathcal{L}$ – ciepło utajone,

T_{ref} – temperatura odniesienia.

f_l – jest charakterystyczną funkcją temperatury definiowaną jako:

$$f_l(T) = \begin{cases} 0 & \text{jeżeli } T < T_{sol} \\ 0 \leq f_l^m(T) \leq 1 & \text{jeżeli } T_{sol} \leq T \leq T_{liq} \\ 1 & \text{jeżeli } T > T_{liq} \end{cases} \quad (3.9)$$

gdzie:

T_{sol} – temperatura solidusu,

T_{liq} – temperatura likwidusu.

3.1 Sformułowanie problemu w metodzie elementów skończonych

Na początku należy wyprowadzić stałą lub wariacyjną postać równania bilansowego (3.1) uwzględniając warunki brzegowe (3.3-3.7) korzystając z metody reszt ważonych. Prawidłowy dobór funkcji wagowych wraz z zastosowaniem twierdzenia transportu Raynolda pozwala na zniesienie warunków termicznych na granicach podobszarów Γ . Korzystając z wyrażenia (3.8) otrzymujemy słabą, temperaturową postać równania modelu w postaci:

$$\begin{aligned}
& \int_{\Omega} W \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV + \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} W \rho \mathcal{L} f_i dV \\
& + \int_{\Omega} \kappa \nabla W \cdot \nabla T dV + \int_{\partial\Omega_q} W \bar{q} dS + \int_{\partial\Omega_c} W h_{env} (T \\
& - T_{env}) dS - \int_{\Omega} W q dV = 0
\end{aligned} \quad (3.10)$$

gdzie:

W – funkcja wagowa.

W kontekście elementów skończonych nieznane pole T jest aproksymowane jako kombinacja liniowa funkcji interpolacyjnych $N_i(x, y, z)$, gdzie funkcje kształtu przedstawiają się następująco:

$$T(x, y, z) = \sum_i^N N_i(x, y, z) T_i \quad (3.11)$$

gdzie:

T_i - temperatura w węźle i ($i = 1; 2; N$) zdyskretyzowanego obszaru.

Wektor temperatur T otrzymany na podstawie temperatur węzłowych (3.11) podstawiamy do równania (3.10) a następnie przyjmując funkcje wagowe W jako funkcje interpolacyjne N ($W \equiv N_i$, metoda Galerkina) otrzymujemy równanie w postaci:

$$\boldsymbol{\psi} = \mathbf{C} \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial t} + \mathbf{K} \mathbf{T} - \mathbf{F} = 0 \quad (3.12)$$

gdzie:

\mathbf{T} – wektor temperatur węzłowych,

\mathbf{C} – macierz pojemności cieplnej,

\mathbf{L} – ciepło utajone,

\mathbf{K} – macierz przewodnictwa,

\mathbf{F} – wektor strumienia zewnętrznego.

Składniki wektora resztkowego $\boldsymbol{\psi}$ są opisane następującymi wzorami:

$$C_{ij} = \int_{\Omega} \rho c N_i N_j dV \quad (3.13)$$

$$L_i = \int_{\Omega} \rho \mathcal{L} f_i N_i dV$$

$$K_{ij} = \int_{\Omega} \kappa \nabla N_i \cdot \nabla N_j dV + \int_{\partial\Omega_c} h_{env} N_i N_j dS$$

Z kolei wektor strumienia zewnętrznego \mathbf{F} przyjmuje postać:

$$F_i = - \int_{\partial\Omega_q} \bar{q} N_i dS + \int_{\partial\Omega_c} h_{env} T_{env} N_i dS - \int_{\partial\Omega} q N_i dV \quad (3.14)$$

Problem przewodzenia ciepła przy braku zmiany fazy został szeroko omówiony w literaturze (patrz np. Zienkiewicz i Taylor (2000)). Postępujemy zgodnie ze schematem nieciągłym opisanym w pozycji literaturowej Fachinotti i in. (1999, 2001), który pozwala uzyskać dokładne rozwiązanie całek (3.13).

Operacja całkowania w czasie odbywa się przy użyciu metody Eulera pierwszego rzędu, którą stosujemy w przypadku równania (3.12), co prowadzi do rozwiązania układu równań nieliniowych dla wartości temperatur w węzłach elementów skończonych na końcu zadanego okresu czasowego z uwzględnieniem przyjętego kroku czasowego:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\psi}_{n+1} &= \mathbf{C}_{n+1} \frac{\mathbf{T}_{n+1} - \mathbf{T}_n}{\Delta_t} + \frac{\mathbf{L}_{n+1} - \mathbf{L}_n}{\Delta_t} + \mathbf{K}_{n+1} \mathbf{T}_{n+1} - \mathbf{F}_{n+1} \\ &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Rozwiązanie silnie nieliniowego dyskretnego równania równowagi (3.15) uzyskuje się za pomocą metody Newtona-Raphsona. W każdej nowej iteracji i , wartość $\boldsymbol{\psi}$ jest przybliżana za pomocą rozwinięcia Taylora pierwszego rzędu.

$$\boldsymbol{\psi}_{(\mathbf{T}^{(i)})} \approx \boldsymbol{\psi}_{(\mathbf{T}^{(i-1)})} + \mathbf{J}_{(\mathbf{T}^{(i-1)})} \Delta \mathbf{T}^{(i)} = \mathbf{0} \quad (3.16)$$

gdzie:

$$\mathbf{J} = \frac{d\boldsymbol{\psi}}{d\mathbf{T}} - \text{macierz Jacobiego (3.15),}$$

$$\Delta \mathbf{T}^{(i)} = \mathbf{T}^{(i)} - \mathbf{T}^{(i-1)} - \text{przyrostowa korekcja temperatur.}$$

Zatem $\Delta \mathbf{T}$ można oszacować w następujący sposób:

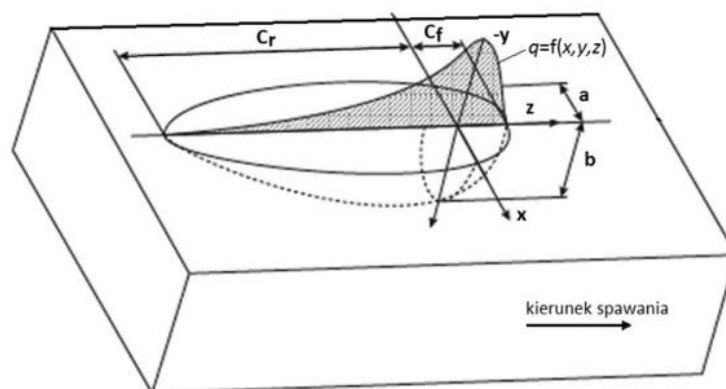
$$\Delta \mathbf{T}^{(i)} = - \left[\mathbf{J}_{(\mathbf{T}^{(i-1)})} \right]^{-1} \boldsymbol{\psi}_{(\mathbf{T}^{(i-1)})} \quad (3.17)$$

Schemat Newtona-Raphsona jest efektywny pod warunkiem, że początkowe założenie $\mathbf{T}^{(0)}$ znajduje się w promieniu zbieżności rozwiązania \mathbf{T} . Alternatywnie, zbieżność można poprawić stosując procedurę przeszukiwania liniowego.

W literaturze można znaleźć weryfikację modelu poprzez porównanie wyników numerycznych i analitycznych dla nieliniowego problemu wymiany ciepła. Problem ten został rozwiązany przez Özisika i Uzzella (1979), a wyniki analiz uzyskanych za pomocą opisanego podejścia wykazały zgodność z odpowiednimi wynikami analitycznymi, co przedstawiono w pozycji literaturowej Anca i in. (2004)

3.2 Modelowanie oraz przyłożenie źródła ciepła

Pole temperatury oraz jej rozkład ma bardzo duże znaczenie w przypadku jakości otrzymanego złącza spawanego. Wpływa między innymi na strukturę spoiny oraz na wielkość obszaru wpływu ciepła. Podczas symulacji procesu spawania, za uzyskany rozkład pola temperatury odpowiada sposób przyłożenia ciepła (model źródła ciepła) oraz jego moc. Zależnie od stosowanej metody spawania kształt źródła ciepła przybiera różne postacie, dlatego bardzo ważny jest jego prawidłowy dobór. Dla procesu spawania łukowego (MIG, MAG, TIG) powszechnie stosowanym modelem źródła ciepła jest podwójna elipsoida Goldaka i in. (1984). Model składający się z dwóch elipsoid pozwala na szerokie spektrum definicji kształtu źródła. Na rys. 36 przedstawiono model podwójnej elipsoidy Goldaka. Cztery parametry definiujące jej kształt pozwalają odwzorować kształt jeziora spawalniczego. Przyjmuje się, iż odległość przed źródłem ciepła powinna być równa połowie szerokości spoiny a długość za źródłem ciepła -równa dwukrotności szerokości spoiny.



Rys. 36 Model podwójnej elipsoidy Goldaka [57]

gdzie:

a – szerokość źródła ciepła,

b – wielkość źródła ciepła w głąb materiału,

c_f – przednia głębokość penetracji wzdłuż kierunku spawania,

c_r – tylna głębokość penetracji wzdłuż kierunku spawania.

Moc źródła procesu może zostać oszacowana na podstawie jego parametrów. Najczęściej wyznacza się ją na podstawie dokumentacji WPS (*ang. Welding procedure specification*) gdzie podana jest wartość ilości wprowadzonego ciepła oraz prędkości przesuwu.

$$Q = T_s \cdot H_i \quad (3.18)$$

gdzie:

q – moc źródła ciepła,
 H_i – ilość wprowadzonego ciepła,
 T_s – prędkość przesuwu.

W przypadku gdy nie ma podanych wyżej wymienionych wartości można również moc wyznaczyć jako iloczyn napięcia łuku oraz natężenia prądu spawania, jednak w tym przypadku należy określić sprawność procesu. Dla procesu spawania łukowego najczęściej sprawność szacuje się na około 78%. Wyrażenie 3.19 przedstawia wzór na moc źródła ciepła.

$$Q = U \cdot I \cdot \eta \quad (3.19)$$

gdzie:

Q – moc źródła ciepła,
 U – napięcie łuku,
 I – natężenie prądu spawania,
 η – sprawność procesu.

Rozkład gęstości zastosowanego źródła ciepła można zapisać przy pomocy następujących zależności, dla przedniej części elipsoidy:

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} f_f Q}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} \cdot e^{(-3\frac{x^2}{a^2})} \cdot e^{(-3\frac{y^2}{b^2})} \cdot e^{(-3\frac{z^2}{c_f^2})} \quad (3.20)$$

oraz dla tylnej części elipsoidy:

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} f_r Q}{abc_r \pi \sqrt{\pi}} \cdot e^{(-3\frac{x^2}{a^2})} \cdot e^{(-3\frac{y^2}{b^2})} \cdot e^{(-3\frac{z^2}{c_r^2})} \quad (3.21)$$

gdzie:

Q – moc źródła ciepła,
 x, y, z – lokalne koordynaty podwójnej elipsoidy Goldaka,
 a, b, c_f, c_r – wielkości charakterystyczne podwójnej elipsoidy Goldaka,
 f_f, f_r – współczynnik dystrybucji ciepła.

Podczas procesu spawania, miejsce spawania i jego bezpośrednie otoczenie ulegają różnym szybkościom nagrzewania/chłodzenia, a co za tym idzie rozszerzania/kurczenia się. W efekcie pojawiają się znaczne naprężenia termiczne. Ze względu na lokalny charakter dostarczania ciepła, rozszerzanie materiału będące wynikiem odkształceń jest ograniczane przez chłodny materiał oddalony od miejsca przyłożonego ciepła. Właściwości fizyczne i

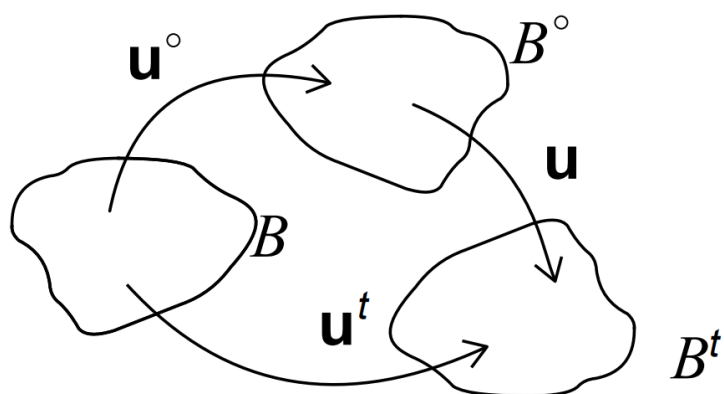
chemiczne materiału zmieniają się w miejscu spawania i w strefie wpływu ciepła, zarówno w trakcie procesu spawania, jak i po nim. Zmiany te wpływają na właściwości mechaniczne materiału i muszą być uwzględnione w analizie mechanicznej.

Ze względu na trójwymiarowy charakter obciążeń, warunków brzegowych i geometrii występujących zwykle w procesach spawania, zaimplementowano trójwymiarowy model mechaniczny. Należy zauważyć, że samo jezioro spawalnicze nie jest modelowane w analizie mechanicznej. Jest to jedynie obszar służący do uwzględnienia doprowadzenia ciepła do modelu termomechanicznego. W tym sensie założono zastosowanie temperatury, powyżej której w analizie mechanicznej nie uwzględnia się dalszych zmian właściwości materiału. Zachowanie materiału termosprężystego w większości przypadków opiera się na uogólnionej wersji prawa Hooke'a z uwzględnieniem odkształceń termicznych. Najważniejszymi parametrami są moduł Younga i współczynnik rozszerzalności cieplnej. Mniejszy wpływ na naprężenia własne i odkształcenia ma współczynnik Poissona (Tekriwal i Mazumder., 1991).

3.3 Uwzględnienie zjawiska topnienia oraz krzepnięcia

Uznaje się, że metoda elementów skończonych ze standardowym modelowaniem materiałów, daje dobre rozwiązania w analizie naprężeń termicznych, nawet gdy na ciało stałe oddziałują temperatury zbliżone do temperatur krzepnięcia. Istnieją jednak szczególne aspekty w modelowaniu problemu ze zjawiskiem topnienia oraz krzepnięcia, które powinny być uwzględnione. Do mechanicznej symulacji tego procesu brane są pod uwagę trzy różne stany dla każdego punktu materialnego i jego otoczenia (rys. 37):

- stan odniesienia (B),
- stan naturalny (B^0), w którym punkt materialny przeszedł w fazę stałą o określonej wytrzymałości mechanicznej,
- stan aktualny (B^t).



Rys. 37. Konfiguracje ciał w problemie topnienia/krzepnięcia

Z uwagi na to, że moment krzepnięcia nie jest taki sam dla wszystkich punktów, każdy punkt materialny ma odpowiadający jemu stan naturalny. Definiując u^0 jako transformację ze stanu odniesienia do stanu naturalnego, u^t jako transformację ze stanu odniesienia do stanu aktualnego a u jako transformację ze stanu naturalnego do stanu aktualnego, można zapisać:

$$\mathbf{u}^t = \mathbf{u} + \mathbf{u}^0 \quad (3.22)$$

Zwykle, gdy stosuje się metodę elementów skończonych, siatka elementów skończonych jest definiowana w początkowym stanie odniesienia (zbiór punktów w czasie $t=0$), jak przedstawiono schematycznie na rys 37.

Przyjmijmy, że \mathbf{X} i \mathbf{x}^0 są układami współrzędnych odpowiednio w stanie odniesienia i w stanie naturalnym. W konsekwencji założenia małych odkształceń w opisie ruchu oraz założenia istnienia pośredniego gradientu odkształcenia w sąsiedztwie każdego punktu otrzymuje się: $\nabla_{\mathbf{X}} \mathbf{x}^0 \approx \mathbb{I}$. To samo założenie pozwala wyznaczyć odkształcenie jako $\boldsymbol{\varepsilon} = \nabla_{\mathbf{x}^0}^{sym} \mathbf{u}$ związane z transformacją ze stanu naturalnego do stanu końcowego, poprzez następujące przybliżenie:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \nabla_{\mathbf{x}^0}^{sym} \mathbf{u} \approx \nabla_{\mathbf{X}}^{sym} \mathbf{u} \quad (3.23)$$

Uwzględniając gradienty w równaniu (3.22) i stosując powyższe założenia, można zweryfikować adekwatny rozkład odkształceń:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^t = \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\varepsilon}^0 \quad (3.24)$$

gdzie:

$\boldsymbol{\varepsilon}^t = \nabla_{\mathbf{X}}^{sym} \mathbf{u}^t$ – tensor odkształcenia w stanie aktualnym w odniesieniu do stanu odniesienia,
 $\boldsymbol{\varepsilon}^0 = \nabla_{\mathbf{X}}^{sym} \mathbf{u}^0$ – tensor odkształcenia w stanie naturalnym w odniesieniu do stanu odniesienia.

3.4 Sformułowanie równań konstytutywnych Lagrangea

Zgodnie z teorią stanu lokalnego (Lemaître i Chaboche, 1994) w danej chwili t , stan termodynamiczny dowolnej cząstki \mathbf{X} ośrodka materialnego jest całkowicie określony przez wartości pewnej liczby zmiennych stanu tej cząstki. Obliczenia dla materiałów niesprężystych wykorzystują formuły zależne od odkształceń przy założeniu znanego pola temperatury. Przyjmując kinematykę liniową, całkowite odkształcenie można przedstawić w następujący sposób:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^i \quad (3.25)$$

gdzie:

$\boldsymbol{\varepsilon}^e$ – odkształcenie termosprężyste (odwracalne),
 $\boldsymbol{\varepsilon}^i$ – odkształcenie niesprężyste (nieodwracalne).

Wprowadzono również skalarną zmienną wewnętrzną α , która charakteryzuje umocnienie izotropowe. Hipoteza umocnienia izotropowego jest powszechnie znana w zastosowaniach spawalniczych (Lindgren, 2001; Francis i Rahman, 2000; Chang i Teng,

2004). Parametrowi umocnienia α odpowiada odkształcenie niesprężyste, zgodnie z wyrażeniem:

$$\alpha = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3}} \|\dot{\varepsilon}^i(\tau)\| d\tau, \quad (3.26)$$

gdzie:

$\dot{\varepsilon}^i$ – szybkość odkształcenia niesprężystego.

Mimo iż zmienne sterujące znajdują się wewnątrz przestrzeni odkształceń, funkcje odpowiedzi są zwykle zapisywane w odniesieniu do sprzężonych sił termodynamicznych: tensor naprężenia σ oraz izotropowa zmienna umocnienia w przestrzeni naprężeń $R = R(\alpha)$.

Tensor naprężenia σ zależy od odkształcenia ε i ε^i opisanych wzorem (3.25). Dla liniowo-sprężystych materiałów izotropowych, naprężenie można wyrazić w postaci:

$$\sigma = \underbrace{\kappa[tr(\varepsilon^e) - 3\varepsilon_{Ther}]}_{\sigma_m} \mathbb{I} + \underbrace{2\mu dev(\varepsilon^e)}_s \quad (3.27)$$

gdzie:

$\kappa = \kappa(T)$ i $\mu = \mu(T)$ – własności materiału zależne od temperatury (odpowiednio: objętość i współczynnik ścinania),

ε_{Ther} – odkształcenie termiczne,

\mathbb{I} - tensor drugiego rzędu,

$tr(\varepsilon^e) = \varepsilon_{ii}^e$ – aksjator tensora drugiego rzędu odkształcenia ε^e ,

$dev(\varepsilon^e) = \varepsilon^e - tr(\varepsilon^e) \frac{\mathbb{I}}{3}$ – dewiator tensora drugiego rzędu odkształcenia ε^e ,

$\sigma_m = \frac{tr(\sigma)}{3}$ – naprężenie średnie,

$s = dev(\sigma)$ – dewiator naprężenia.

Rozszerzalność cieplna jest określona przez funkcję liniowej rozszerzalności cieplnej (TLE) zgodnie z formułą:

$$\varepsilon_{Ther} = TLE(T) = \int_{T_{ref}}^T \alpha_T(\tau) d\tau \quad (3.28)$$

gdzie:

α_T – współczynnik rozszerzalności cieplnej,

T_{ref} – temperatura odniesienia.

Kryterium plastyczności von Misesa można zapisać w postaci:

$$f = \|s\| - \sqrt{\frac{2}{3}} [\sigma_Y + R(\alpha)] \quad (3.29)$$

gdzie:

σ_Y – granica plastyczności,
 $R(\alpha)$ – zmienna umocnienia.

W powiązaniu z powyższym kryterium plastyczności uwzględnia się następującą regułę przepływu:

$$\dot{\varepsilon}^i = \gamma n \quad (3.30)$$

gdzie:

$n = \frac{s}{\|s\|}$ – znormalizowane odchylenie naprężenia, określające normalną do powierzchni plastyczności von Misesa $f = 0$.

$$\gamma \dot{f} = 0 \quad (3.31)$$

gdzie:

γ – parametr konsystencji (dla materiałów plastycznych określa się go za pomocą warunku konsystencji).

Finalnie funkcję umocnienia można zapisać w następujący sposób:

$$\dot{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} \|\dot{\varepsilon}^i\| = \sqrt{\frac{2}{3}} \gamma \quad (3.32)$$

3.5 Implementacja w metodzie elementów skończonych

Pomijając efekty bezwładności, równanie równowagi pędu można zapisać jako:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} = 0 \quad \forall \mathbf{X} \in \Omega_s \quad (3.33)$$

Powyższe równanie należy uzupełnić następującymi warunkami brzegowymi:

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} \quad \forall \mathbf{X} \in \partial\Omega_{s,u} \quad (3.34)$$

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \bar{\mathbf{t}} \quad \forall \mathbf{X} \in \partial\Omega_{s,t} \quad (3.35)$$

Równanie opisuje standardowy quasi-statyczny problem wartości brzegowych w mechanice ciała stałego (Hughes, 1987), który polega na znalezieniu pola przemieszczeń \mathbf{u}

spełniającego równania całkowe w całej dziedzinie Ω_s , dla wszystkich dopuszczalnych funkcji wagowych przemieszczenia w .

$$\int_{\Omega_s} \sigma : \nabla^s \omega dV = \int_{\Omega_s} \rho b \cdot \omega dV = \int_{\alpha\Omega_{s,t}} \bar{t} \cdot \omega dS \quad (3.36)$$

Równanie (3.36) jest słabą postacią równania równowagi pędu (3.33),

gdzie:

ρb – siła masowa (przypadająca na jednostkę objętości),

\bar{t} – przemieszczenie określone na części brzegu $\partial\Omega_{s,t}$ (warunki brzegowe przemieszczenia dla pozostałej części brzegu $\partial\Omega_{s,u}$ zakłada się a priori).

Funkcje przemieszczenia definiuje się następująco:

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^{n_u} N_i \mathbf{U}_i \quad (3.37)$$

gdzie:

N_i – funkcje kształtu,

\mathbf{U}_i – przemieszczenie węzłowe.

Po zastąpieniu \mathbf{u} we wzorze (3.36) (uzupełnionym o warunki brzegowe) wyznaczonym na podstawie wzoru (3.37) przybliżeniem dla poszczególnych elementów skończonych oraz przyjęciu funkcji kształtu jako funkcji wagowych (sformułowanie Galerkina), otrzymujemy:

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}_{int} - \mathbf{F}_{ext} = \mathbf{0} \quad (3.38)$$

gdzie:

$$\mathbf{F}_{int} = \int_{\Omega_s} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}(u) dV \quad (3.39)$$

$$\mathbf{F}_{ext} = \int_{\Omega_s} \mathbf{N}^T \rho \mathbf{b} dV + \int_{\partial\Omega_{s,t}} \mathbf{N}^T \bar{\mathbf{t}} dS \quad (3.40)$$

gdzie:

\mathbf{B} – macierz elementów skończonych określająca zależność między odkształceniem a przemieszczeniem $\boldsymbol{\varepsilon}^t = \mathbf{B}\mathbf{U}$.

Nieliniowy układ równań (3.38) rozwiązuje się iteracyjnie, aproksymując układ w i -tej iteracji z wykorzystaniem liniowego rozwinięcia Taylora.

$$\mathbf{R}_{(U^{(i)})} \approx \mathbf{R}_{(U^{(i-1)})} + \mathbf{J}_{(U^{(i-1)})} \Delta U^{(i)} = \mathbf{0} \quad (3.41)$$

gdzie:

$\mathbf{J} = \frac{d\mathbf{R}}{d\mathbf{U}}$ - macierz Jakobianu,

$\Delta \mathbf{U}^{(i)} = \mathbf{U}^{(i)} - \mathbf{U}^{(i-1)}$ – poszukiwany kierunek.

Korekcja iteracyjna zmiennych jest zdefiniowana przez:

$$\Delta U^{(i)} = - \left[\mathbf{J}_{(U^{(i-1)})} \right]^{-1} \mathbf{R}_{(U^{(i-1)})} \quad (3.42)$$

W przypadku problemu termicznego, schemat Newtona-Raphsona jest uzupełniony procedurami przeszukiwania liniowego w celu przyspieszenia zbieżności.

3.6 Wpływ rodzaju elementu na czas i precyzję obliczeń

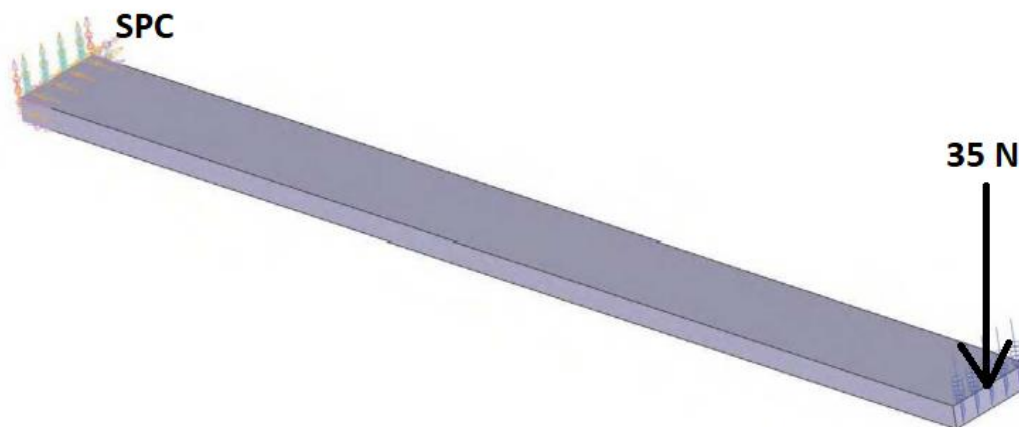
Wybór elementu skończonego jego typ, rząd, wielkość oraz rodzaj ma bezpośredni wpływ na czas w jakim przypadek obliczeniowy zostanie rozwiązany oraz na dokładność rozwiązania. Zazwyczaj zastosowanie elementów skończonych małych rozmiarów (gęstsza siatka elementów skończonych) wymaga większej mocy obliczeniowej i dłuższego czasu obliczeń w porównaniu do przypadku, w którym zastosowano elementy o większych rozmiarach. Gęstsza dyskretyzacja obszaru wpływa na większą liczbę stopni swobody, a co za tym idzie – większą złożoność zadania. Dodatkowo mniejsze elementy zapewniają bardziej dokładne wyniki w porównaniu do większych elementów. Szczególnie istotne jest zwiększanie gęstości siatki elementów skończonych w obszarach, w których występują spiętrzenia naprężeń. Należy jednak unikać zbyt dużego zagęszczenia elementów, co może prowadzić zwiększenia nakładu obliczeniowego bez istotnego wpływu na dokładność wyników.

Rząd elementu - elementy wyższego rzędu (np. elementy z kwadratowymi lub sześciennymi funkcjami kształtu) wymagają zwiększonych zasobów obliczeniowych i dłuższego czasu obliczeń w porównaniu do elementów niższego rzędu (z liniowymi funkcjami kształtu). Wynika to z faktu, że elementy wyższego rzędu wymagają większej liczby punktów interpolacji i bardziej skomplikowanych funkcji kształtu, co zwiększa złożoność obliczeniową problemu. Dodatkowo elementy wyższego rzędu zazwyczaj dostarczają bardziej dokładnych wyników w porównaniu do elementów niższego rzędu. Elementy wyższego rzędu lepiej odzwierciedlają krzywiznę lub skomplikowaną geometrię oraz dokładniej odwzorowują rzeczywiste układy. Jednak korzyść z wykorzystania elementów wyższego rzędu może być mniejsza, jeśli rozwiązanie nie wykazuje istotnych zmienności lub jeśli geometria modelu jest prosta.

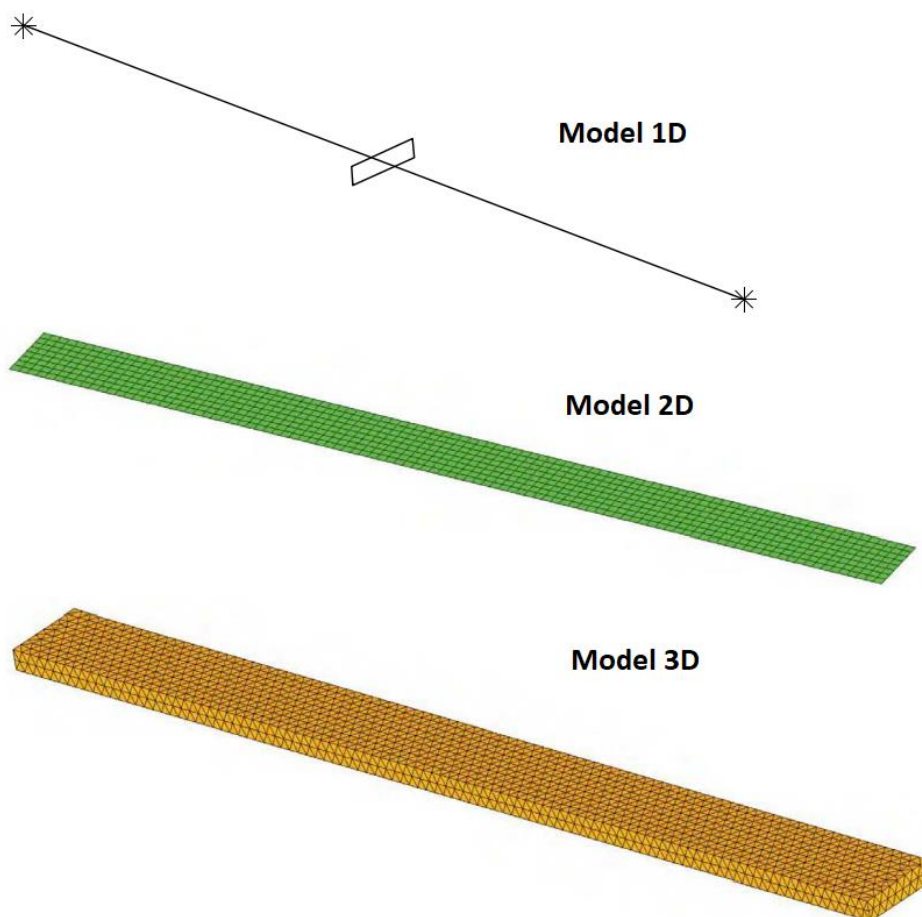
Rodzaj modelu - różne rodzaje modeli: model jednowymiarowy, model powłokowy lub model bryłowy, mają zróżnicowany poziom złożoności i wymagania obliczeniowe. Na przykład elementy trójwymiarowe stosowane w modelu bryłowym, wymagają zazwyczaj większych zasobów obliczeniowych niż elementy powłokowe (dwuwymiarowe). Dodatkowo wybór formuły elementu zależy od geometrii analizowanego komponentu oraz

samego problemu, jak i wymaganego poziomu dokładności. Różne modele mają mieć różne założenia i ograniczenia, które mogą wpływać na precyzję otrzymywanych wyników. Na przykład elementy powłokowe mogą nie uwzględniać pewnych efektów (np. ścinania poprzecznego) w porównaniu do elementów bryłowych. Ważne jest znalezienie odpowiedniej równowagi między czasem obliczeń a precyzją wyników. Wykorzystanie odpowiedniego typu elementu, jego rozmiaru i rzędu, które odpowiadają charakterystyce problemu, może pomóc uzyskać dokładne wyniki przy adekwatnych zasobach obliczeniowych. Zaleca się przeprowadzenie sprawdzenia zbieżności w celu oceny wpływu rozmiaru i rzędu elementu na precyzję otrzymywanych wyników oraz dobór optymalnego zdyskretyzowanego modelu.

Poniżej przedstawiono prosty przykład analizy numerycznej belki o wymiarach 250x50x5 mm obciążonej siłą 35 N na prawym końcu i sztywno podpartej po stronie przeciwnej (rys. 38). Rys. 39 przedstawia belkę dla trzech różnych metod modelowania. Wyniki zestawiono w tab. 1, która zawiera dane dotyczące liczby węzłów, elementów oraz otrzymane wyniki w postaci naprężeń oraz przemieszczeń maksymalnych.



Rys. 38. Schemat podparcia i obciążenia belki



Rys. 39. Porównanie metod modelowania

Tab. 1. Statystyka modeli oraz otrzymane wyniki

Rozwiązanie	Liczba węzłów	Liczba elementów	Liczba stopni swobody	Naprężenie [MPa]	Przemieszczenie [mm]
Analityczne	-	-	-	105	4.23
1D	2	1	12	105	4.23
2D	909	800	5 454	103	4.21
3D	17 448	9 569	52 344	104	4.21

Wyniki ukazują, że nie zawsze bardziej skomplikowane rozwiązanie lub większa ilość stopni swobody wpływa na dokładność rozwiązania. W zależności od specyfikacji komputera, na którym przeprowadzane są obliczenia, szybkość obliczeń może być również zmienna i zależna od liczby stopni swobody w modelu obliczeniowym, dlatego bardzo ważny jest odpowiedni dobór modelu, typu elementu oraz jego rozmiaru dla rozpatrywanego zagadnienia.

4 System optymalizacji

Metoda Elementów Skończonych (MES) oraz symulacja systemowa to kluczowe narzędzia wykorzystywane w inżynierii do modelowania i analizy skomplikowanych zjawisk fizycznych i procesów. Mimo iż obie metody mają różne zastosowanie i podejście do problemu, ich połączenie może dostarczyć wyjątkowo bogatej i szczegółowej analizy systemu jako całości. Sprzężenie tych dwóch metod pozwala na uwzględnienie zarówno lokalnych szczegółów, które są mocną stroną metody elementów skończonych, jak i globalnych aspektów systemu, które są z kolei mocną stroną symulacji systemowej. Symulacja systemowa w kontekście omawianego tematu oznacza analizę całego systemu (nie tylko poszczególnych składowych), który odzwierciedla rzeczywiste warunki panujące w środowisku produkcyjnym. Dzięki symulacji można testować różne parametry, aby znaleźć najlepsze rozwiązanie a wirtualne testowanie odpowiedzi układu pozwala na poprawę kontroli procesu. Z tego powodu opracowany system można uznać za złożony przykład symulacji systemowej. Poniżej przedstawiono kilka przykładów, z różnych dziedzin przemysłu, w których sprawdzają się rozwiązania systemowe oraz symulacje MES:

- **energetyka wiatrowa:**
 - MES - analiza naprężeń i drgań w łopatkach turbiny wiatrowej,
 - symulacja systemowa - modelowanie dynamiki całej turbiny wiatrowej, w tym generacji mocy, układu kontroli i interakcji z siecią energetyczną.
- **przemysł samochodowy:**
 - MES: Analiza termiczna i naprężeń w bloku silnika lub układzie hamulcowym,
 - symulacja systemowa: Modelowanie zachowania całego pojazdu, takie jak dynamika jazdy, sterowanie elektroniczne czy zużycie paliwa.
- **przemysł elektroniczny:**
 - MES: Analiza termiczna i naprężeń w układach scalonych,
 - symulacja systemowa: Modelowanie działania całego urządzenia elektronicznego, z uwzględnieniem interakcji pomiędzy komponentami i układami zasilania.
- **przemysł kolejowy - systemy hamulcowe:**
 - MES: Analiza termiczna tarcz hamulcowych podczas intensywnego hamowania, badanie naprężeń i zużycia materiału,
 - symulacja systemowa: Modelowanie całego układu hamulcowego, z uwzględnieniem dynamiki hamowania, układu hydraulicznego i sterowania.
- **przemysł kolejowy - akustyka i wibracje:**
 - MES: Badanie hałasu i wibracji generowanych przez różne komponenty pojazdu oraz struktury torowe,
 - symulacja systemowa: Ocena poziomów hałasu i wibracji przy różnych warunkach jazdy, wpływu na otoczenie i komfortu pasażerów.

Przedstawione w poprzednich rozdziałach problemy występujące często w praktyce produkcyjnej komponentów, wytwarzanych przy zastosowaniu technologii spawania, skłoniły autora pracy – zarazem inżyniera dostrzegającego te problemy na co dzień, do podjęcia próby stworzenia systemu zapewniającego wsparcie decyzyjne człowieka w zadaniach takich jak:

- planowanie sekwencji spawania, badanie wpływu kolejności spawania na odkształcenia,
- planowanie doboru baz oraz docisków, badanie wpływu rodzaju podparcia na odkształcenia,
- planowanie rozmieszczenia baz oraz docisków, badanie wpływu lokalizacji podpór na odkształcenia,
- planowanie parametrów WPS (prędkość spawania, energia spawania itp.), badanie wpływu ilości wprowadzonego ciepła podczas procesu na odkształcenia.

Realizując wyszczególnione zadania system nie tylko ma informować / przewidywać / planować w zakresie podanym wyżej, ale również wspierać decyzyjne konstruktorów przyrządowania produkcyjnego, dla których informacje pozyskane dzięki niemu stają się kluczowe i wytyczają kierunek działań. Podobnie jest w przypadku inżynierów spawalników. Tym samym system staje się narzędziem doradczym, spełniającym definicję systemu sztucznej inteligencji rozwiązującego trudny problem i wspierającego decyzje człowieka. Dodatkowo system zakłada zastosowanie procedury wzorującej się na działaniu sieci neuronowych – narzędzia typowego dla sztucznej inteligencji w celu przyspieszenia procesów decyzyjnych. Są również inne pozytywne aspekty wtórne zastosowania systemu, takie jak chociażby aspekt finansowy.

W niemiejszym rozdziale opisano szczegółowo opracowany system wspomagający minimalizację odkształceń cieplnych komponentów spawanych w wyniku optymalizacji rozmieszczenia punktów mocowań. Metoda pozwala na przewidywanie odkształceń komponentów spawanych po procesie spawania i dostosowanie punktów podparcia w przyrządach w celu ich minimalizacji. Podczas procesu optymalizacji istnieje możliwość zdefiniowania przęgień technologicznych oraz wstępnego ustawienia części składowych tak, aby uwzględnić w końcowej geometrii efekt skurczu. Jest to bardzo ważne, ponieważ w pewnych przypadkach wstępne odkształcenie komponentu może całkowicie wyeliminować deformacje po zakończonym procesie spawania. W treści rozdziału omówiono również zastosowane procedury dotyczące modelowania, zastosowaną procedurę optymalizacji inspirowaną działaniem sieci neuronowych oraz autorskie procedury wspomagające optymalizację.

Poniżej na rys. 40 przedstawiono schemat blokowy pokazujący relację przyczynowo - skutkową pomiędzy optymalizacją procesu spawania na wczesnym etapie projektowania produktu a płynącymi korzyściami finansowymi.



Rys. 40. Schemat blokowy korzyści po wprowadzeniu opracowanego systemu

System z założenia ma wspomagać proces produkcyjny poprzez odpowiedni dobór miejsc podparcia. W pierwszej kolejności należy przeprowadzić analizę dla rozpatrywanej konstrukcji lub komponentu pod względem możliwych do zrealizowania wiązań podporowych. Po etapie definicji wszystkich możliwych punktów podparcia oraz zadaniu parametrów procesu, można przeprowadzić proces obliczeń numerycznych oraz znaleźć rozwiązanie optymalne.

4.1 Opis funkcji celu oraz kryteriów optymalizacji

W celu minimalizacji odkształceń termicznych przyjęto kryterium optymalizacji opierające się na minimalizacji przemieszczeń w obrębie komponentu spawanego po zakończeniu procesu technologicznego. Zależnie od potrzeb kryterium minimalizacji może dotyczyć minimalizacji maksymalnego przemieszczenia jakie wystąpiło punktowo w całym komponentie lub w wybranej części jego obszaru. Istnieje również możliwość zdefiniowania kryterium minimalizacji przemieszczeń będących średnią przemieszczeń wskazanych węzłów. Aby zrealizować założone kryterium przyjęto następującą funkcję celu:

$$f_1 = \alpha \cdot \sum_{i=1}^n u_i^2 + \beta \cdot \sum_{i=1}^n p_i^2 \rightarrow \min f(u, p) \quad (4.1)$$

gdzie:

α, β – współczynniki wagowe,

u_i – przemieszczenie spowodowane warunkami termicznymi pochodzącymi z procesu spawania w i-tym węźle,

p_i – przemieszczenie spowodowane oddziaływaniem mechanicznym w i-tym węźle,

n – liczba węzłów.

Tak określona funkcja celu (4.1) uwzględnia różne czynniki mające wpływ na deformację struktury. Optymalizacja ma na celu minimalizację kwadratów przemieszczeń pochodzących od warunków termicznych i kwadratów przemieszczeń wywołanych działaniem sił zewnętrznych. Wartości współczynników wagowych dają możliwość dostosowania znaczenia każdego czynnika w zależności od potrzeb i rozpatrywanego problemu.

Ograniczenia jakie występują w opracowanym systemie dotyczą głównie cech geometrycznych związanych z rozpatrywanym problemem. Zdefiniowano następujące ograniczenia:

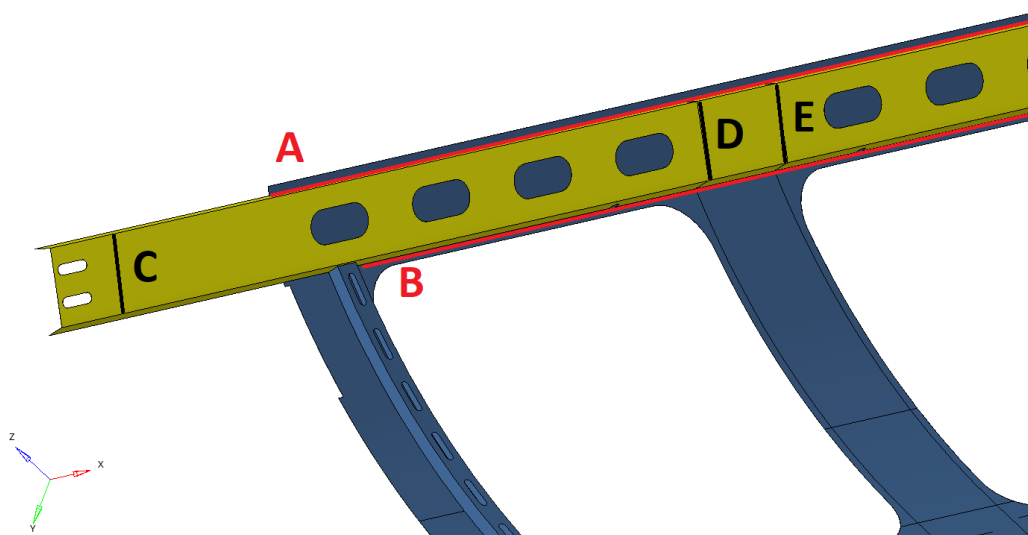
- Ograniczenie na maksymalną ilość punktów mocowań w obrębie konstrukcji lub w danym obszarze. W trakcie definiowania możliwych punktów mocowań można określić podobszar, do którego będą one przypisane. Przypisanie punktów mocowań do konkretnego obszaru odbywa się poprzez wprowadzenie odpowiedniego nazewnictwa. Przykładowo, w zbiorze wszystkich podpór występują podpory SPC1-A, SPC3-A, SPC5-A, które przypisane są do obszaru A oraz SPC2-B, SPC4-B, SPC6-B, które przypisane są do obszaru B. Dzięki takiemu rozwiązaniu, użytkownik ma możliwość wyboru obszarów, dla których chce przypisać punkty podparcia. Może również zdecydować, czy wprowadzi dla wszystkich obszarów jednakowe ograniczenie dotyczące maksymalnej ilości punktów podparcia, czy wskaże różne ograniczenia dla odrębnych obszarów.
- Ograniczenie przestrzenne (technologiczne) – często występują przypadki, w których z różnych przyczyn nie ma możliwości zdefiniowania punktu mocowania czy podparcia, dlatego konstrukcje przyrządów a co za tym idzie określone punkty muszą być dostosowane do warunków i ograniczeń przestrzennych, które są zależne od geometrii komponentu spawanego. Ograniczenia przestrzenne są brane pod uwagę przy określaniu możliwych punktów mocowań czy też podparcia.
- Ograniczenie na rozpiętość podparcia – ograniczenie daje możliwość określenia wielkości obszaru, w którym podparcie lub zamocowanie może być zastosowane.
- Rodzaj punktu mocowania – ograniczenie tego typu daje możliwość określenia podparcia oraz kierunków, w których zadane podparcie ma działać.
- Ograniczenia na minimalny oraz maksymalny rozstaw punktów podparcia – ograniczenie tego typu daje możliwość określenia minimalnej oraz maksymalnej odległości między punktami podparcia.

4.2 Opis opracowanego systemu optymalizacji

Początkowo w systemie założono zastosowanie sieci neuronowej. Po konsultacji potrzeb oraz oczekiwań przedstawicieli firmy w zakresie wdrożenia zdecydowano się na uproszczenie systemu i wprowadzono operację bazującą na działaniu sztucznej sieci neuronowej, w której nie uwzględniono uczenia się. Operacja pozwala na utworzenie kombinacyjnych zestawów podpór dla rozpatrywanego problemu produkcji komponentu spawanego. Uproszczenie zostało wprowadzone w związku z dużym skomplikowaniem

części pociągu, dla których wymagano pełnej stosowalności systemu. Dodatkowo założono, iż system po wprowadzeniu może być stosowany przez innych użytkowników oraz w innych lokalizacjach firmy na świecie. Biorąc pod uwagę dużą złożoność geometryczną części – na przykład ściana boczna pociągu, jej gabaryt, ilość operacji spawania, dowolną kolejność operacji, różne typy podpór, łącznie z uwzględnieniem wymuszonej przez podpory, strzałki ugięcia czy możliwość dowolnego rozmieszczenia dowolnej ilości podpór, samo przygotowanie zestawu uczącego oraz przygotowanie zadania wymagałoby bardzo dużej wiedzy informatycznej oraz powołanego zespołu. Innym ograniczeniem było narzucone oprogramowanie, wykorzystywane przez firmę. Konsultacje z przedstawicielami / informatykami firmy HyperWorks tworzącymi oprogramowanie również potwierdziły wniosek, iż stworzenie systemu bazującego na zastosowaniu sieci neuronowej w sposób adaptacyjny do danego problemu i przy spełnieniu oczekiwań firmy byłoby wyzwaniem nawet dla samego twórcy oprogramowania. Opracowaną sieć neuronową uproszczono więc do wspomnianej procedury, która działa automatycznie w powiązaniu ze stosowanym, przez firmę, oprogramowaniem oraz jest możliwa do zastosowania w praktyce produkcyjnej oraz inżynierskiej. W opisie procedury zachowano nomenklaturę stosowaną w przypadku sieci neuronowych.

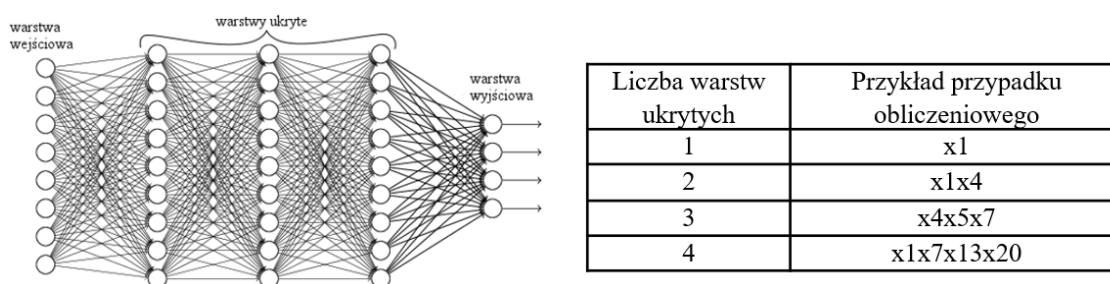
Działanie systemu rozpoczyna wprowadzenie danych wejściowych, w postaci parametrów spawania. Następnie wprowadzony zostaje układ możliwych podpór. Użytkownik ma możliwość wyboru miejsc, w których podpory mają być generowane lub nie. Na przykład dla operacji spawania profilu do konstrukcji poszycia wagonu użytkownik ma możliwość zbadania wpływu podpór umieszczonych wzdłuż linii A, B, C, D oraz E (rys. 41), wyczerpując możliwe konfiguracje, lub też ograniczenia generowania podpór dla wybranych krawędzi podłużnych A i B (nie ma konieczności rozpatrywania wszystkich punktów mocowania i może zrezygnować z rozmieszczenia podpór na liniach: C, D, E).



Rys. 41. Przykład definicji podpór w obrębie komponentu spawanego

Następnie użytkownik deklaruje ilość podpór wzdłuż danej krawędzi (w dalszej części pracy zostanie omówiona metodologia wprowadzania podpór). Określając liczbę podpór, użytkownik deklaruje zarazem liczbę elementów algorytmu, który tworzy automatycznie konfiguracje zestawów podpór działając w sposób podobny do działania sieci neuronowej. Na rys. 42 przywołano przykładowy schemat funkcjonalny algorytmu, gdzie:

- Warstwa wejściowa – liczba wszystkich punktów wiązań mieszczących się w wybranych rzędach/lokalizacjach podpór. Dla przykładu w przypadku zademonstrowanym powyżej (rys.41) w rzędach A oraz B mieści się łącznie 20 punktów wiązań (co wynika z przyjętego podziału uwzględniającego technologiczną długość zestawów podporowych). Wówczas liczba elementów „warstwy wejściowej” będzie równa 20.
- Warstwy ukryte – jeden „rzęd” warstwy ukrytej stanowi jedną zmienną w kombinacji. Ilość neuronów każdej z warstw ukrytej jest równa ilości elementów warstwy wejściowej. W tabeli obok schematu (rys. 42) przedstawiono w jaki sposób ilość rzędów warstwy ukrytej wpływa na wynik końcowy pracy algorytmu. Przykładowo wybierając cyfrę 2 – jako liczbę rzędów warstwy ukrytej – wynik algorytmu zawsze będzie zbiorem składającym się z dwóch wyrazów. Analogicznie do przykładu spawania profilu (rys.41), jeśli 20 stanowi całkowitą liczbę podpór w rzędach A i B, a użytkownik chciałby zbadać różne konfiguracje dla 10 lokalizacji w pojedynczym przypadku obliczeniowym, algorytm stworzyłby, zgodnie ze wzorem na kombinacje bez powtórzeń 184 756 unikatowych przypadków obliczeniowych, dla różnych i niepowtarzalnych kombinacji lokalizacji podpór zapisanych w warstwie wyjściowej.

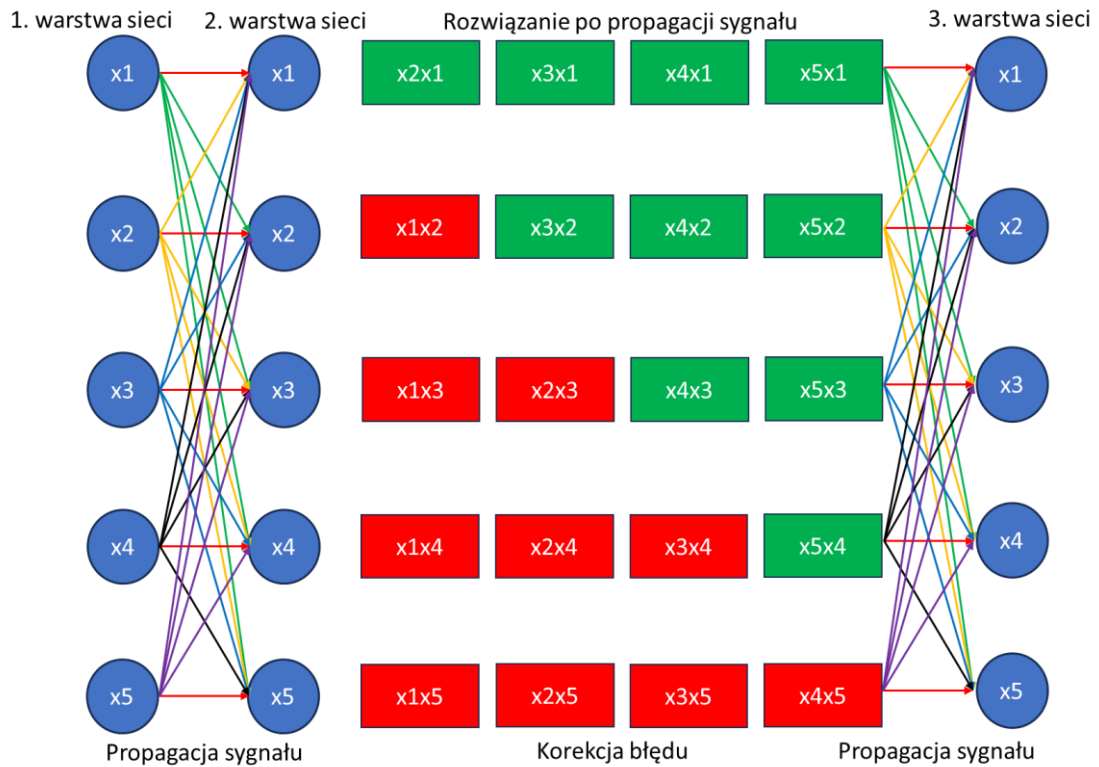


Rys. 42. Schemat ogólny zastosowanej procedury

Na schemacie przedstawionym na rys. 43 pokazano propagację sygnału między drugą a trzecią warstwą ukrytą. Dla pozostałych warstw algorytm działa analogicznie. Sygnał po wyjściu z drugiej warstwy ukrytej tworzy zbiór, a więc łączy informację z warstwy pierwszej razem z informacją z warstwy drugiej i tworzy wejście do kolejnej warstwy. Przykładowo po wyjściu z elementu X drugiej warstwy ukrytej tworzy zbiory (x2x1) (x3x1) (x4x1) (x5x1), nie tworzy zbioru (x1x1), gdyż byłoby to powtórzenie. Dzieje się to za sprawą funkcji aktywacji, która dopuszcza do dalszego procesu prawidłowo zdefiniowane kombinacje. Poprawnie zdefiniowane zbiory stanowią warstwę wejściową do trzeciej warstwy sieci, syntezując informacje i tworząc 3-wyrazowy element (x2x1x3...). Algorytm działa analogicznie aż do osiągnięcia ostatniej warstwy ukrytej. Otrzymane w efekcie zbiory zapisuje jako elementy wynikowe w warstwie wyjściowej.

Funkcja aktywacji działa na zasadzie porównywania informacji zapisywanych po przejściu sygnału przez każdą komórkę X. W przypadku komórki (x1x1), sygnał zapamiętuje, że po wyjściu z pierwszej warstwy zapisał informację o wartości opowiadającej x1, a więc propagując w głąb oraz uwzględniając dalsze przejście przez kolejną komórkę z warstwy drugiej tworzy komórkę (x1x1). Przed propagacją sygnału dalej - do warstwy trzeciej, następuje porównanie informacji z warstwy pierwszej z sygnałem z warstwy drugiej

i podjęcie decyzji czy sygnał jest przekazywany do dalszej analizy. Przykład schematu decyzyjnego dla komórek $x1x1$ oraz $x1x2$ przedstawiono na rys. 43.

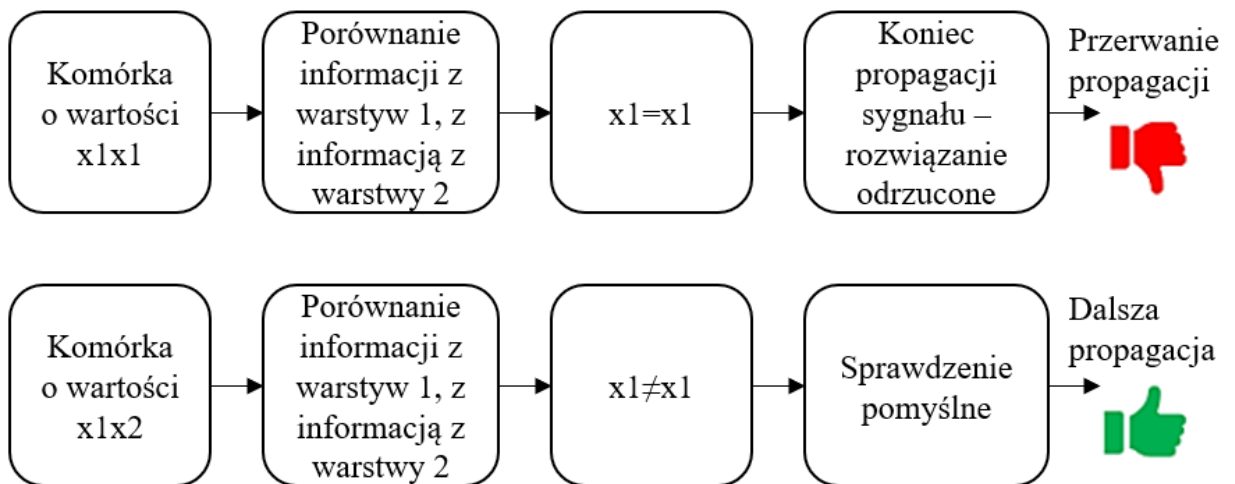


Rys. 43 Schemat propagacji sygnału między drugą a trzecią warstwą ukrytą

Formuła (4.2) przedstawia podejmowanie decyzji przez funkcję aktywacji w ujęciu matematycznym. Wartość 1 funkcji pozwala na przekazywanie informacji dalej, wartość 0 przerywa propagację sygnału w głąb sieci.

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x_n \neq x_{n-1} \\ 0, & x_n = x_{n-1} \end{cases} \quad (4.2)$$

Schemat podejmowania decyzji przez funkcję aktywacji przedstawiono na rys. 44.



Rys. 44. Schemat podejmowania decyzji przez funkcję aktywacji

Domyślnie w algorytmie każda podpora posiada taką samą wagę równą 1. Dodatkowo istnieje możliwość definicji dodatkowych kryteriów oceny sygnału poprzez określenie różnych wag dla zróżnicowanych lokalizacji podpór. Jeśli w konstrukcji znajduje się lokalizacja, wzdłuż której fizycznie utwierdzenie komponentu jest łatwiejsze lub dany obszar ma szczególne wymogi co do jakości powierzchni, można tym lokalizacjom nadać wyższą wagę względem trudniej dostępnych.

Po wymianie informacji między wszystkimi komórkami sieci opracowanego algorytmu tworzona jest macierz rozwiązań, która jest poddawana w końcowym etapie ponownie funkcji aktywacji eliminującej powtórzenia sekwencji zdefiniowanej przez algorytm lokalizacji podpór. Porównuje ona komórki np. (x1x2) oraz (x2x1) – wykrywając powtórzenie dopuszcza do zbioru wynikowego tylko jedno rozwiązanie, które jest tożsame. Formuła (4.3) przedstawia proces podejmowania decyzji w ujęciu matematycznym. Jeśli suma informacji z dwóch kolejnych sygnałów jest różna od siebie równanie uzyskuje wartość 1 i sygnał zostaje przekazywany dalej. Jeśli suma informacji z dwóch kolejnych sygnałów jest równa, równanie uzyskuje wartość 0 i propagacja sygnału zostaje przerwana.

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \sum_{i=0}^n (x_i x_{i+1} \dots x_n) \neq \sum_{i=0}^{n-1} (x_i x_{i+1} \dots x_{n-1}) \\ 0, & \sum_{i=0}^n (x_i x_{i+1} \dots x_n) = \sum_{i=0}^{n-1} (x_i x_{i+1} \dots x_{n-1}) \end{cases} \quad (4.3)$$

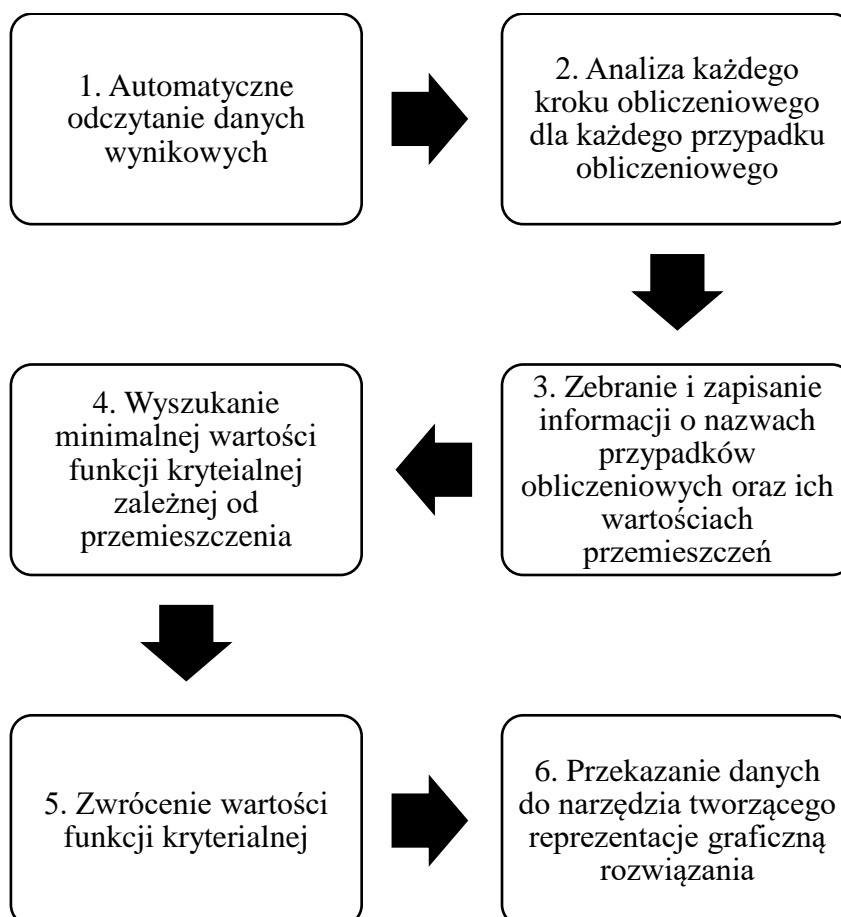
Poprawne komórki, zestawione po przejściu przez końcową funkcję aktywacji stanowią warstwę wyjściową.

Definiowanie przypadków obliczeniowych manualnie jest bardzo czasochłonne i obarczone dużym ryzykiem błędu przy tak wielu zmiennych. Szacuje się, że wykonanie jednego przypadku bez użycia algorytmu zajmuje około 5 minut. Dla porównania przeprowadzono test, w którym algorytm stworzył scenariusze obliczeniowe dla 20 podpór oraz 3 warstw otrzymując tym samym 1140 kombinacji. Czas utworzenia takiego zadania zajął mniej niż 1 minutę. Manualna definicja tego typu warunków brzegowych szacowana jest na 95 godzin pracy.

4.2.1 Analiza przestrzeni rozwiązań – poszukiwanie rozwiązania optymalnego

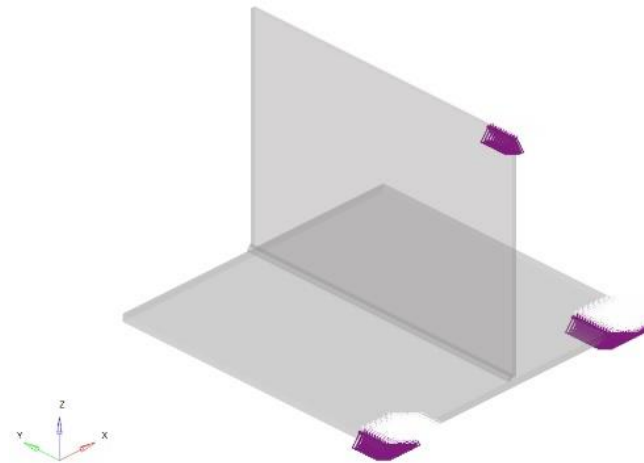
Opracowana metodologia daje możliwość przeanalizowania wszystkich konfiguracji rozmieszczenia podpór w układzie (lub zbioru wybranych, wskazanych przez użytkownika). W przypadku zadań, w których istnieje nieskończoność lub duża liczba (dziesiątki tysięcy) rozwiązań, sprawdzenie każdego przypadku obliczeniowego, zapisanie wyniku a następnie wybranie optymalnego rozwiązania staje się niemożliwe. Z tego powodu wprowadzono system wspomagający odnalezienie optymalnego rozwiązania oraz jego graficznie przedstawienie w celu efektywnej oceny wyniku. W tym celu wykorzystano post procesor HyperView jako narzędzie służące do odczytu wartości przemieszczenia w obrębie analizowanej konstrukcji spawanej oraz wymiany danych z opisanym wcześniej

algorytmem generacji zestawów podpór. Stworzony algorytm komunikacji tworzy dwie listy, w których zapisuje wyniki uzyskane dla poszczególnych zestawów wprowadzonych podpór. W ostatnim etapie wywoływana jest funkcja, która automatycznie przeszukuje zbiór rozwiązań znajdując minimalną wartość funkcji kryterialnej zależnej od przemieszczenia, wskazując tym samym optymalne rozwiązanie zadania. Istnieje możliwość znalezienia lokalnych ekstremów dla obszarów, które wskaże użytkownik. Wymaga to jednak zmiany domyślnych wartości w algorytmie. Rys. 45 przedstawia schemat działania algorytmu.



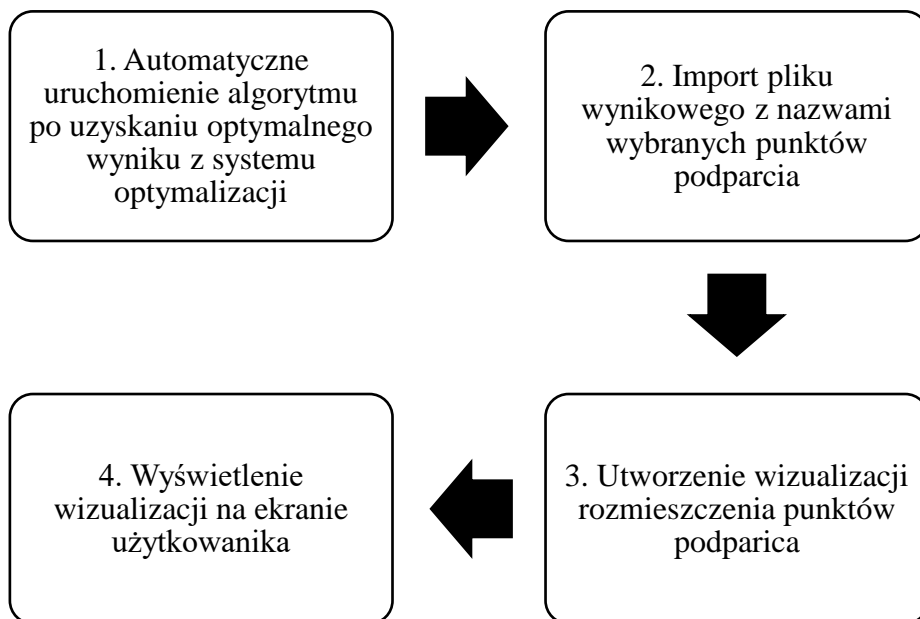
Rys. 45. Schemat działania algorytmu poszukującego minimum funkcji kryterialnej

Ponieważ system podaje optymalny zestaw podpór w formie nazw własnych poszczególnych punktów podparcia zgodnie z nadanym im nazewnictwem podczas tworzenia modelu numerycznego, określenie ich lokalizacji wiązałoby się z manualnym sprawdzeniem zestawu w programie. Dla skomplikowanych zagadnień powodowałoby to konieczność przeszukania kilkuset możliwych punktów podparcia oraz zapisania ich lokalizacji. Aby usprawnić proces wyboru oraz identyfikacji otrzymanego rozwiązania stworzono procedurę, która automatycznie wyświetla reprezentację graficzną optymalnego rozwiązania na modelu geometrycznym. Dodatkowo wizualizacja jest zapisywana w formie zdjęcia w folderze, w którym prowadzony jest proces optymalizacji. W tym celu samoczynnie uruchamia się ona po skończonym procesie optymalizacji i pobiera plik wynikowy do dalszej obróbki danych. Na rys. 46 przedstawiono przykład reprezentacji graficznej.



Rys. 46. Reprezentacja graficzna rozwiązania

Poniżej na rys. 47 przedstawiono schemat blokowy działania procedury:



Rys. 47. Procedura wspomagająca wyświetlanie reprezentacji graficznej rozwiązania

4.3 Algorytmy wspomagające przygotowanie modelu numerycznego

W trakcie tworzenia systemu optymalizacji zwrócono uwagę na operacje powtarzalne, które wymagały dużego nakładu pracy. Dla takich operacji wprowadzono algorytmy wspomagające, które automatycznie wykonują określone zadania. Zastosowane rozwiązania znacznie skracają czas potrzebny na przygotowanie modelu. Wszystkie algorytmy wspomagające zostały stworzone w środowisku TCL, który jest kompatybilny z oprogramowaniem metody elementów skończonych HyperWorks, zastosowanym w systemie. Zastosowanie algorytmów przeznaczonych do podziału spoin oraz

automatycznego przykładania termicznego warunku brzegowego wyeliminowało możliwość popełniania błędów, który jest wysoce prawdopodobny przy manualnym wykonywaniu kilkuset lub kilku tysięcy powtarzalnych czynności.

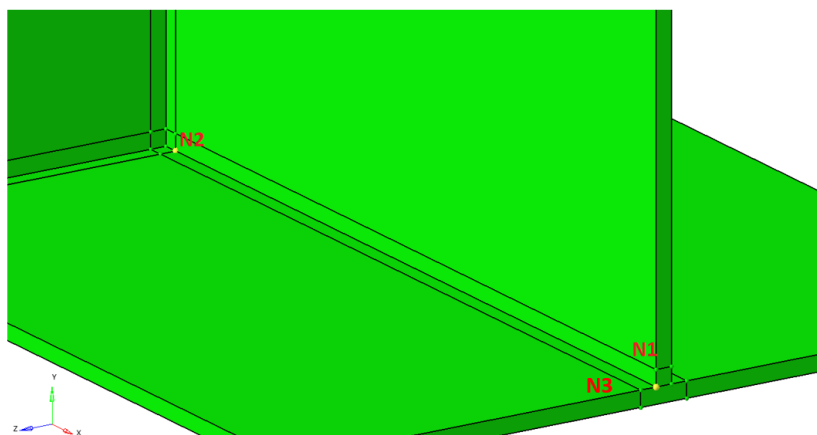
4.3.1 Modelowanie spoiny w środowisku HyperWorks, algorytm wspomagający

W praktyce inżynierskiej, najczęściej konstruktorzy nie modelują spoin w modelu geometrycznym. Oznaczane są w późniejszym etapie na technicznej dokumentacji rysunkowej. W przypadku komponentów, w których występuje duża ilość spoin, ich modelowanie jest bardzo czasochłonne przy zastosowaniu standardowych funkcji zaimplementowanych w programach metody elementów skończonych. Aby usprawnić proces tworzenia siatki elementów skończonych spoiny, została opracowana metoda, która wspomaga utworzenie jej geometrii. Model spoiny tworzony jest odcinkami, wzdłuż wybranych punktów N1 oraz N2, które określają kierunek oraz długość tworzonej geometrii (wektor bazowy). Aby prawidłowo określić położenie spoiny względem łączonych elementów należy wskazać kolejny punkt N3 tworzący wektor prostopadły zgodnie z regułą prawej ręki (rys. 48). Po utworzeniu wektora bazowego oraz płaszczyzny prostopadłej należy podać promień spoiny, która zostanie automatycznie dodana do modelu (rys. 49). Długość spoiny wyznaczana jest na podstawie wzoru (4.4).

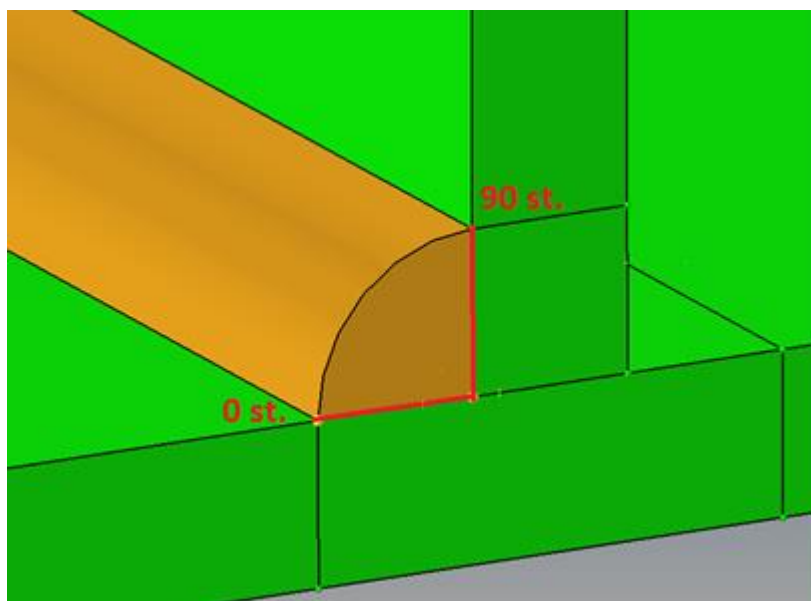
$$|h| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (4.4)$$

gdzie:

- x_1, x_2 – współrzędna x dla punktu N1, N2,
- y_1, y_2 – współrzędna y dla punktu N1, N2,
- z_1, z_2 – współrzędna z dla punktu N1, N2.

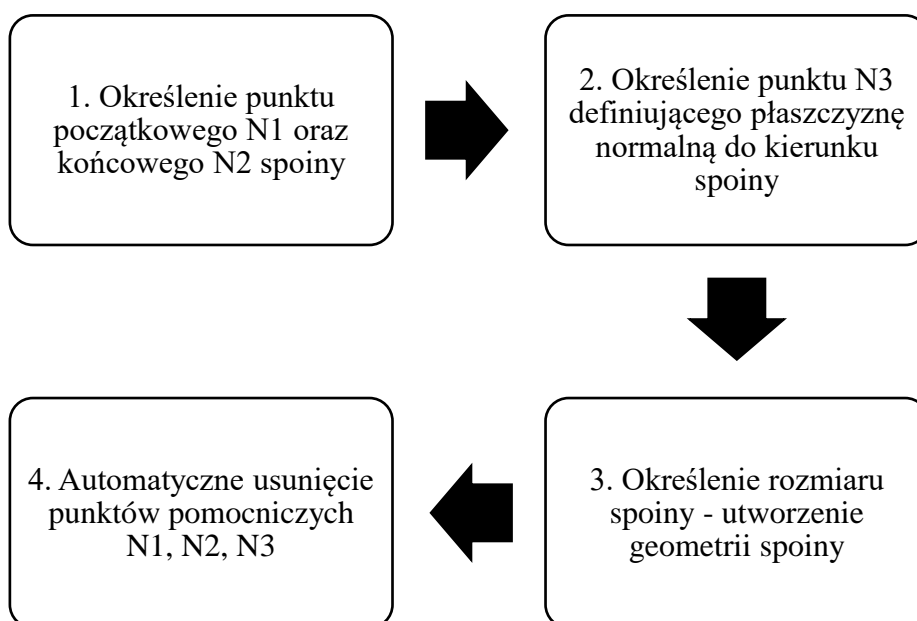


Rys. 48. Modelowanie spoiny - definicja punktów wektora głównego oraz płaszczyzny prostopadłej



Rys. 49. Utworzona geometria spoiny

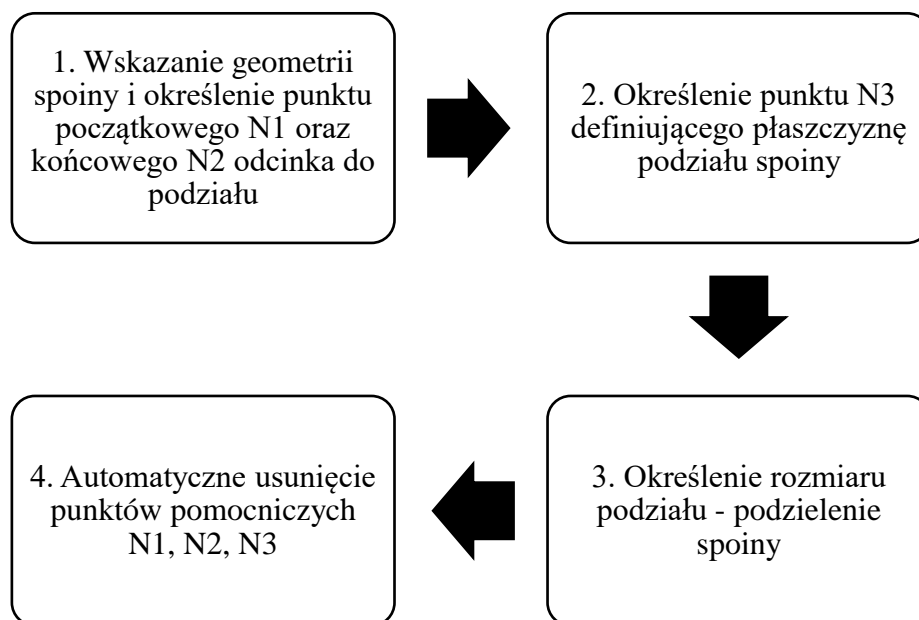
Na rys. 50 przedstawiono schemat blokowy opisujący działanie procedury oraz tworzenie geometrycznej reprezentacji spoiny.



Rys. 50. Schemat blokowy metody tworzenia reprezentacji geometrycznej spoiny

Zgodnie z dobrymi praktykami modelowania i tworzenia siatki elementów skończonych, spoina powinna przejąć podział geometryczny na długości zgodnie z istniejącym podziałem głównych elementów geometrycznych modelu. Dlatego też zaimplementowano metodę umożliwiającą podział utworzonej geometrii spoiny w przekroju poprzecznym zgodnie z rozmiarem elementów występujących wzdłuż biegnącej spoiny. W celu podziału geometrii spoiny należy ją wskazać a następnie analogicznie do schematu dotyczącego tworzenia jej geometrii zdefiniować punkt początkowy N1 oraz końcowy N2. Płaszczyzna podziału spoiny jest wskazywana, jak poprzednio, poprzez wskazanie punktu

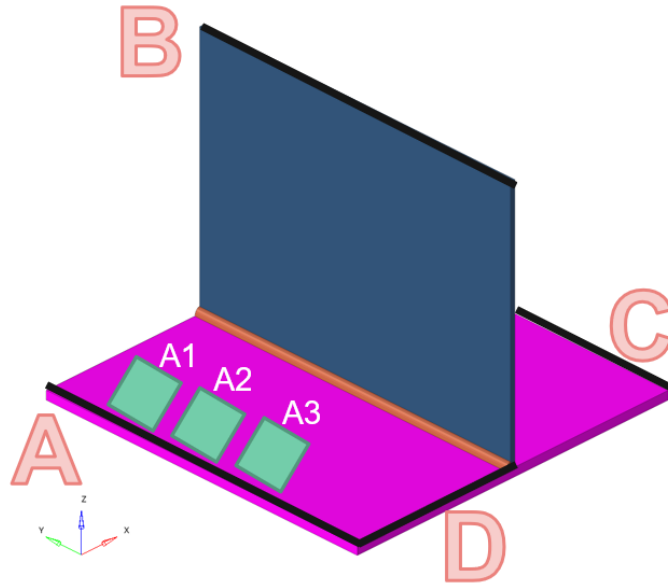
N3, podział następuje zgodnie z wartością podaną przez użytkownika. Jeśli wymagany jest podział na różne długości to należy manualnie zaznaczyć na modelu miejsce cięcia pokrywające się z siatką elementów skończonych na łączonych elementach. Jeżeli podział jest równomierny – procedura działa w pełni automatycznie, dlatego też modelując geometrię najlepiej założyć podział równomierny. Na rys. 51 przedstawiono schemat blokowy opisujący działanie metody.



Rys. 51. Schemat blokowy metody podziału spoiny

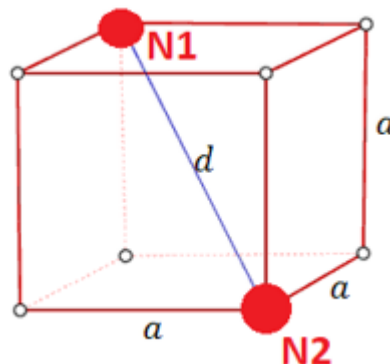
4.3.2 Tworzenie komponentów reprezentujących rozmieszczenie podpór

W trakcie przygotowywania modelu numerycznego użytkownik musi samodzielnie określić miejsca podparcia oraz utwierdzenia konstrukcji, które będą rozpatrywane w procesie optymalizacji. Opracowano algorytm, który wspomaga ten proces. Na podstawie zdefiniowanych przez użytkownika parametrów wejściowych, algorytm automatycznie tworzy kombinacje podpór i odpowiadające im przypadki obliczeniowe, które są gotowe do uruchomienia. Na rys. 52 przedstawiono przykład numeracji podpór.



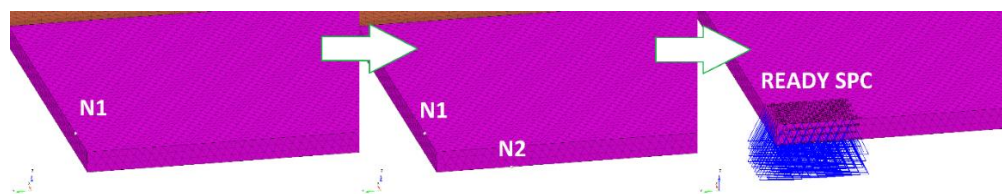
Rys. 52. Przykład numeracji podpór

Podpora tworzona jest poprzez zdefiniowanie przez użytkownika przekątnej prostopadłościanu, w którym punkt N1 określa początek a punkt N2 koniec przekątnej (rys. 53). Po dokonaniu wyboru, automatycznie tworzona jest geometryczna reprezentacja podpory, a węzły elementów skończonych znajdujące się w przestrzeni zdefiniowanego obszaru tworzą wiązania. Po ich zdefiniowaniu określa się, które stopnie swobody mają zostać odebrane.



Rys. 53. Definiowanie geometrycznej reprezentacji podpory

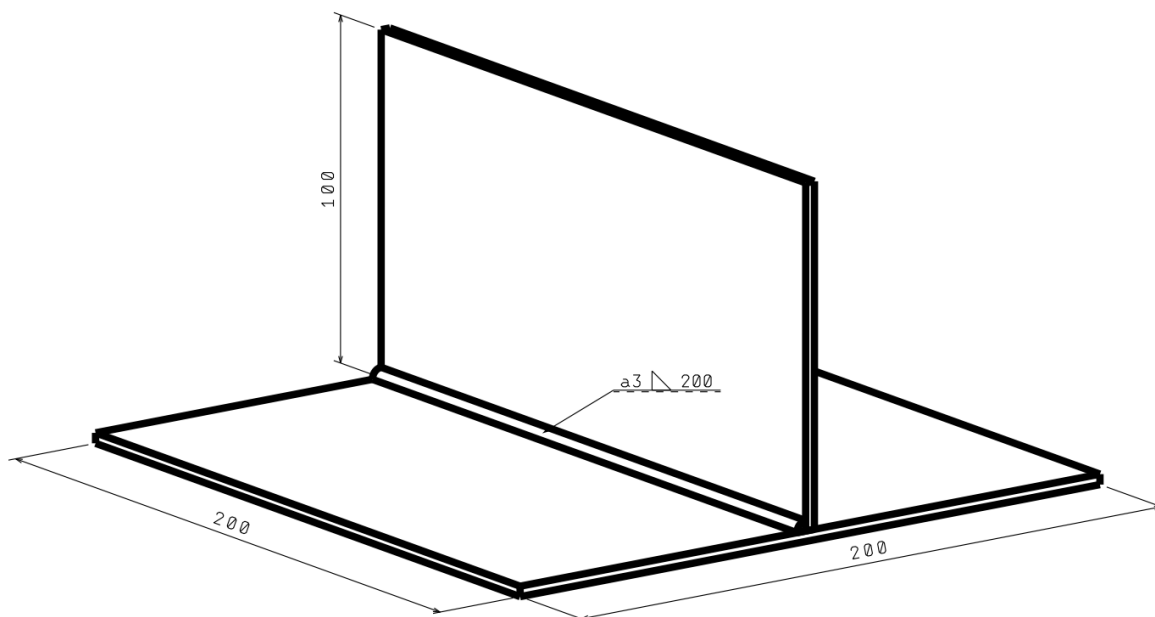
Na rys. 54 przedstawiono schematycznie proces definicji podpór (wiązań). Po zakończeniu procesu tworzenia wiązań algorytm automatycznie rozpoznaje, które podpory należą do danej krawędzi, wylicza również ich ilość.



Rys. 54. Proces definicji wiązań

4.4 Opis opracowanego systemu optymalizacji na przykładzie

W celu przybliżenia zasady działania opracowanego systemu, w niniejszym rozdziale przedstawiono przykład praktyczny obejmujący symulację numeryczną MES oraz proces optymalizacji rozmieszczenia podpór przy zadanych ograniczeniach. Proces optymalizacji przeprowadzono na przykładowej próbce o wymiarach 200x200x100 mm przedstawionej na rys. 55. Utworzony model składa się z elementów o rozmiarze 3 mm, jest to model hybrydowy, w którym spoina oraz jej bezpośrednie sąsiedztwo zostało zamodelowane elementami typu 3D a pozostałe powierzchnie elementami typu 2D pierwszego rzędu.



Rys. 55. Widok rozpatrywanej próbki

Materiałem rodzimym jest aluminium 6005 T6, dane materiałowe oraz przyjęte parametry przedstawiono w tab. 2.

Tab. 2. Własności materiałowe oraz parametry procesu

Moduł Younga	Gęstość	Moduł Poissona	Przewodność cieplna	Wsp. rozszerzalności cieplnej
$7 \cdot 10^4$ [MPa]	2,7 [g/cm ³]	0,33	193 [W/(m·K)]	23,3 [10 ⁻⁶ ·K ⁻¹]
Wymiar spoiwa [mm]	Natężenie [A]	Napięcie [V]	Prędkość przesuwu [cm/min]	Ilość wprowadzonego ciepła [KJ/cm]
φ1,2	190-230	22,2-23,4	64	4,04
Temperatura otoczenia [°C]	Czas chłodzenia [s]	Konwekcja [W/(m ² ·K)]	Współczynnik emisyjności powierzchni	Moc źródła ciepła [W]
25	20	50	0,8	5250

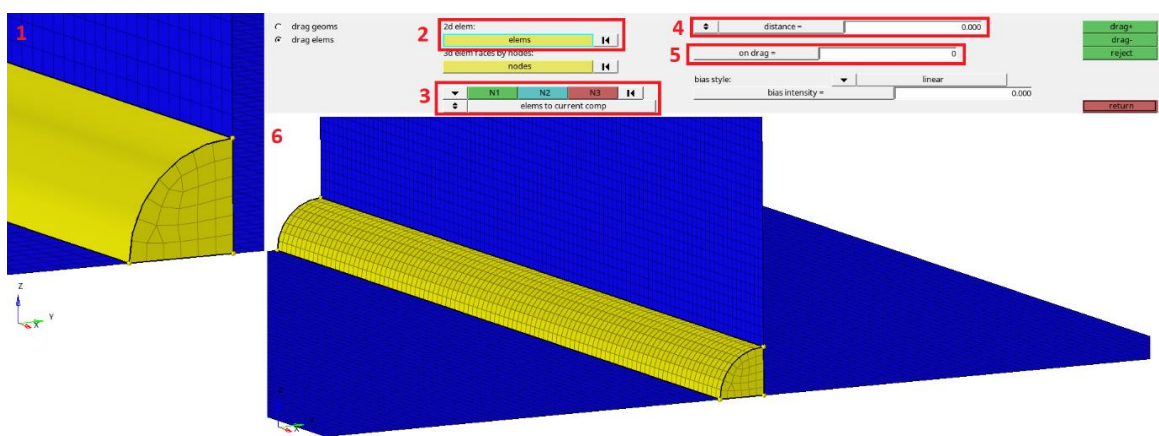
Niezależnie czy analiza procesu spawania jest przeprowadzana na uprzednio stworzonej siatce elementów skończonych czy na podstawie geometrii CAD, proces tworzenia modelu

spoiny rozpoczyna się od utworzenia bryły, która jest jej reprezentacją. Proces jest zautomatyzowany, został szerzej opisany w rozdziale 4.3.1. Przyjęto spoinę pachwinową o rozmiarze a3.

Po utworzeniu geometrii spoiny następuje etap jej dyskretyzacji. W celu uzyskania poprawnych wyników w relatywnie krótkim czasie zalecane jest użycie elementów sześciociennych, ośmiowęzłowych (typu HEX8). Utworzenie bryłowej siatki elementów skończonych spoiny polega na:

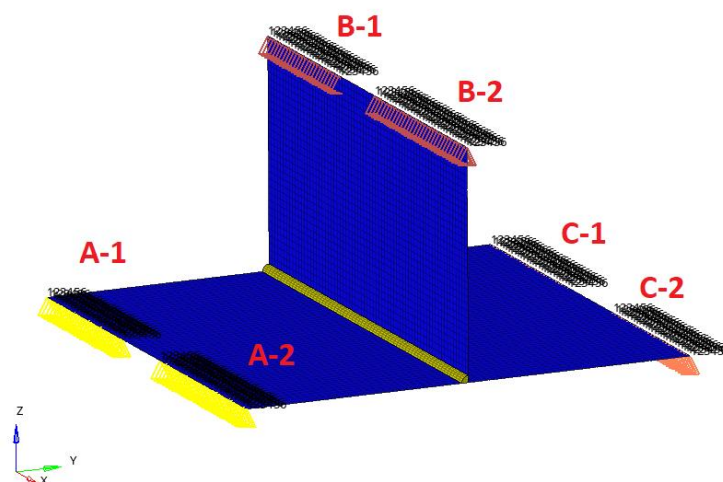
- dyskretyzacji powierzchni czołowej elementami 2D,
- stworzeniu siatki bryłowej spoiny poprzez wyciągnięcie powierzchni wzdłuż tworzącej powstałej bryły i ewentualne dopasowanie dyskretyzacji do podziałów istniejących w aktualnie rozpatrywanym modelu MES,
- usunięciu elementów 2D z powierzchni czołowej spoiny.

Na rysunku rys. 56, przedstawiono schematycznie proces dyskretyzacji spoiny.



Rys. 56. Schemat procesu dyskretyzacji spoiny

Zgodnie z instrukcją opisaną w rozdziale 4.3.2 w następnym kroku definiowane są wszystkie punkty mocowania w obrębie konstrukcji, które w dalszej części będą podlegały optymalizacji. Na rys. 57 przedstawiono rozkład lokalizacji punktów mocowania dla omawianego przykładu. Wyróżniono trzy podzbiory A, B oraz C odpowiadające różnym krawędzią. Warunki są niesymetryczne, punkty zamocowania A-1, B-1 oraz C-1 są dłuższe względem punktów A-2, B-2 oraz C-2.



Rys. 57 Rozkład lokalizacji podpór

Algorytm daje możliwość wyboru, które krawędzie (zestawy podpór) mają zostać wzięte pod uwagę podczas analizy (nie ma konieczności wyboru wszystkich). Dodatkowo można zdefiniować - jaka liczba pojedynczych podpór ma zostać uwzględniona w procesie optymalizacji przez algorytm generacji zestawów podpór. W tab. 3 oraz na rys. 58 przedstawiono liczbowo przykładowe przypadki obliczeniowe stworzone automatycznie dla różnych konfiguracji liczby podpór oraz krawędzi, wzdłuż której są ułożone. Z uwagi na fakt największej liczby przypadków obliczeniowych, do dalszych rozważań została wybrana konfiguracja oznaczona literą E.

Tab. 3 Przypadki obliczeniowe uzyskane dla różnych konfiguracji algorytmu generacji zestawów podpór

Liczba krawędzi	Liczba podpór	Wynikowa liczba przypadków obliczeniowych	Oznaczenie na rysunku	Przewidywany czas manualnego zakładania przypadków obliczeniowych [min]
2	2	6	A	30
	3	4	B	20
	4	1	C	5
3	2	15	D	75
	3	20	E	100
	4	15	F	75



Rys. 58 Przypadki obliczeniowe uzyskane dla różnych konfiguracji algorytmu generacji zestawów podpór

Algorytm, tworząc proces spawania odpowiednio synchronizuje w czasie przykładowe źródło ciepła za pomocą warunku brzegowego odpowiadającego podwójnej elipsoidzie Goldaka. Zgodnie z zadaną prędkością spawania, czas spawania został określony na ok. 18 sekund. Pierwszy przypadek obliczeniowy zdefiniowany jest jako termiczny przypadek obliczeniowy, będący podstawą dla obliczeń termomechanicznych dla różnych wariantów podpór. Pozostałe przypadki mechaniczne są tworzone przez algorytm a ich liczba zależy od zdefiniowanych konfiguracji. W takim przypadku funkcja celu przyjmuje następującą postać:

$$f_2 = \alpha \cdot u_{i \max}^2 + \beta \cdot p_{i \max}^2 \rightarrow \min f(u, p) \quad (4.5)$$

gdzie:

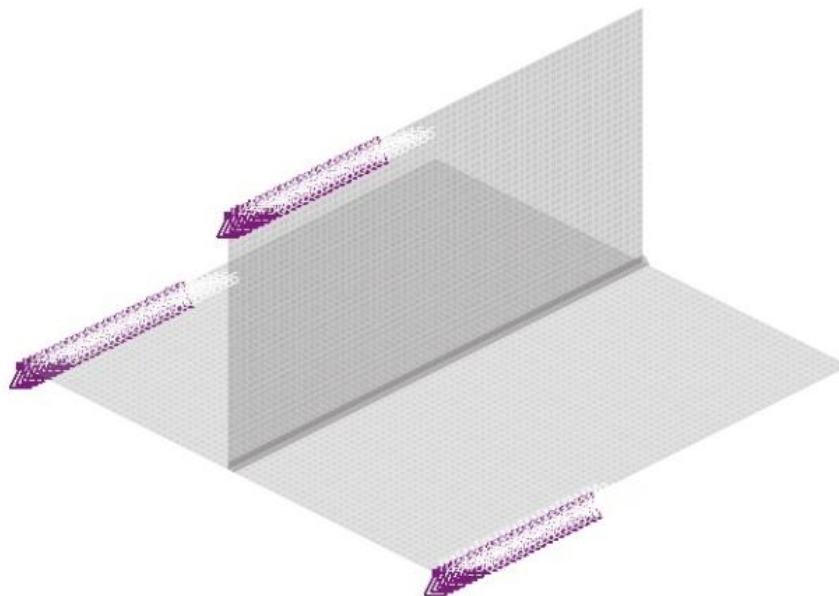
α, β – współczynniki wagowe,

$u_{i \max}$ – maksymalne przemieszczenie spowodowane warunkami termicznymi pochodzącymi z procesu spawania w i-tym węźle,

$p_{i \max}$ – maksymalne przemieszczenie spowodowane oddziaływaniem mechanicznym w i-tym węźle.

W celu sprawnej weryfikacji wyników analizy procesu została stworzona zewnętrzna procedura, umożliwiająca definiowanie warunków, dla których zostanie wyświetlona wizualizacja konfiguracji podpór. Domyślnie algorytm jako rozwiązanie optymalne traktuje

minimalną wartość kwadratów uzyskanego przemieszczenia w i-tym węźle. Najmniejszą wartość przemieszczenia otrzymano dla konfiguracji podpór SPC-A-1 SPC-B-1 SPC-C-1. Wizualizacja przedstawiona na rys. 59 jest tworzona automatycznie.



Rys. 59 Wizualizacja wyniku w postaci wyświetlonych punktów mocowania

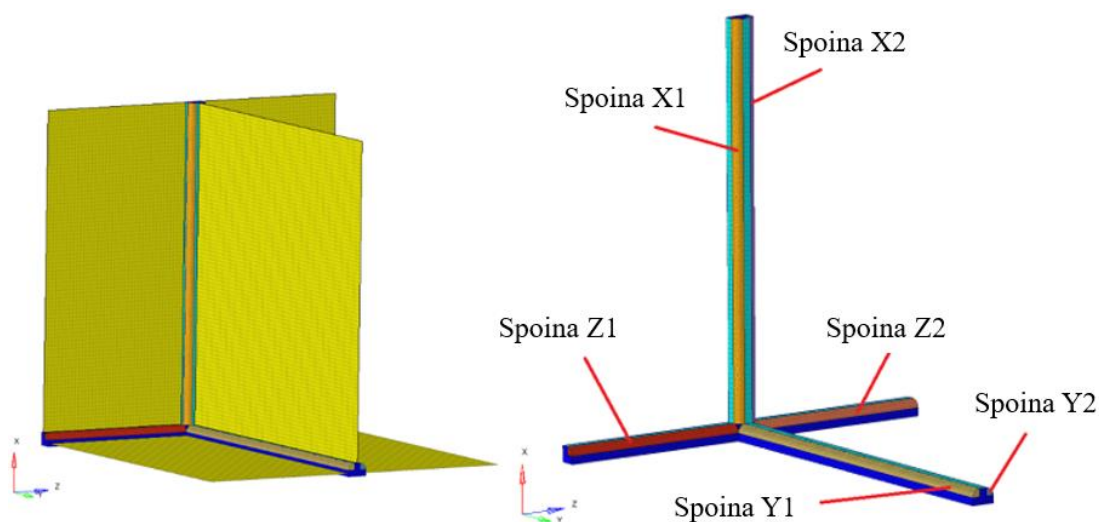
Poniżej w tab. 4 zestawiono wyniki dla wszystkich przypadków obliczeniowych. W trakcie procesu optymalizacji nie ma konieczności prowadzenia obliczeń dla wszystkich przypadków.

Tab. 4. Wyniki minimalizacji maksymalnego przemieszczenia dla wszystkich przypadków obliczeniowych

Nazwa zawierająca SPC	Wartość przemieszczenia [mm]
SPC-A-1 SPC-A-2 SPC-B-1	1.57
SPC-A-1 SPC-A-2 SPC-B-2	1.61
SPC-A-1 SPC-A-2 SPC-C-1	1.39
SPC-A-1 SPC-A-2 SPC-C-2	1.70
SPC-A-1 SPC-B-1 SPC-B-2	1.56
SPC-A-1 SPC-B-1 SPC-C-1	1.27
SPC-A-1 SPC-B-1 SPC-C-2	1.51
SPC-A-1 SPC-B-2 SPC-C-1	1.36
SPC-A-1 SPC-B-2 SPC-C-2	1.57
SPC-A-1 SPC-C-1 SPC-C-2	1.38
SPC-A-2 SPC-B-1 SPC-B-2	1.58
SPC-A-2 SPC-B-1 SPC-C-1	1.51
SPC-A-2 SPC-B-1 SPC-C-2	1.64
SPC-A-2 SPC-B-2 SPC-C-1	1.57
SPC-A-2 SPC-B-2 SPC-C-2	1.72
SPC-A-2 SPC-C-1 SPC-C-2	1.70
SPC-B-1 SPC-B-2 SPC-C-1	1.57
SPC-B-1 SPC-B-2 SPC-C-2	1.58
SPC-B-1 SPC-C-1 SPC-C-2	1.58
SPC-B-2 SPC-C-1 SPC-C-2	1.61

4.5 Wpływ kolejności spawania na uzyskane wyniki

W ramach dodatkowych badań dotyczących wrażliwości systemu, zostały przeprowadzone symulacje wpływu kolejności spawania na odkształcenie uzyskane podczas procesu oraz po procesie spawania. Rozpatrzono trzy różne sekwencje. Do testu użyto hybrydowego sposobu modelowania, utworzono model powłokowo-bryłowy. Spoina oraz bezpośrednio jej sąsiedztwo zostało zamodelowane elementami typu 3D, pozostały obszar elementami typu 2D. Analizowany model został przedstawiony na rysunku rys. 60.



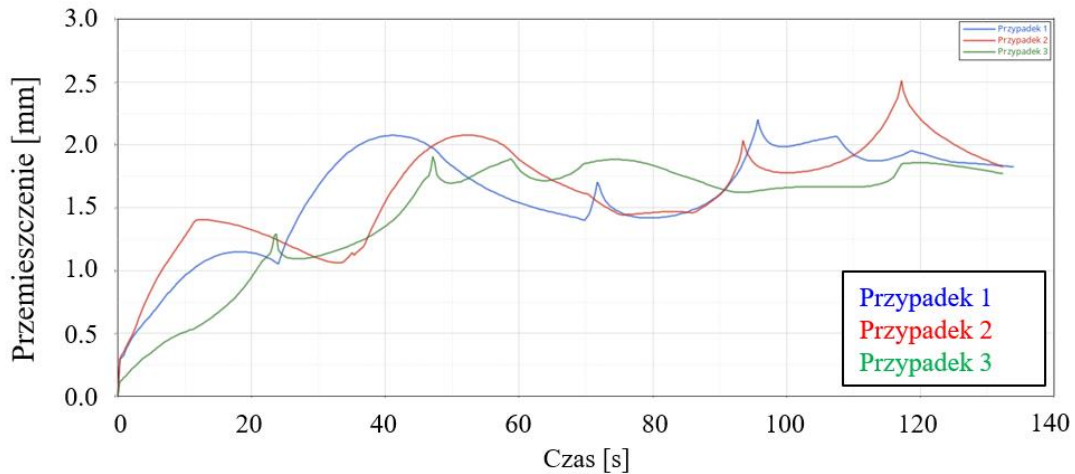
Rys. 60. Analizowany model z oznaczeniem spoin

Kolejność spawania dla 3 różnych przypadków została przedstawiona w tab. 5.

Tab. 5. Rozpatrzone przypadki kolejności spawania

Nr przypadku	Kolejność spawania
1	Z1, Y1, Y2, Z2, X1, X2
2	Y1, Y2, X1, X2, Z1, Z2
3	X1, X2, Z1, Z2, Y1, Y2

Pozostałe warunki brzegowe oraz parametry pozostały takie same jak dla próbki opisanej w rozdziale 4.4. Poniżej przedstawiono wykres maksymalnego przemieszczenia od czasu dla każdej analizowanej sekwencji spawania (rys. 61).



Rys. 61. Wykres maksymalnego przemieszczenia od czasu dla poszczególnych sekwencji spawania

W tab. 6 przedstawiono wartość przemieszczenia w modelu po zakończonej symulacji procesu dla każdego z wariantów – przemieszczenie po procesie różni się nieznacznie około 2.8% (tab. 6).

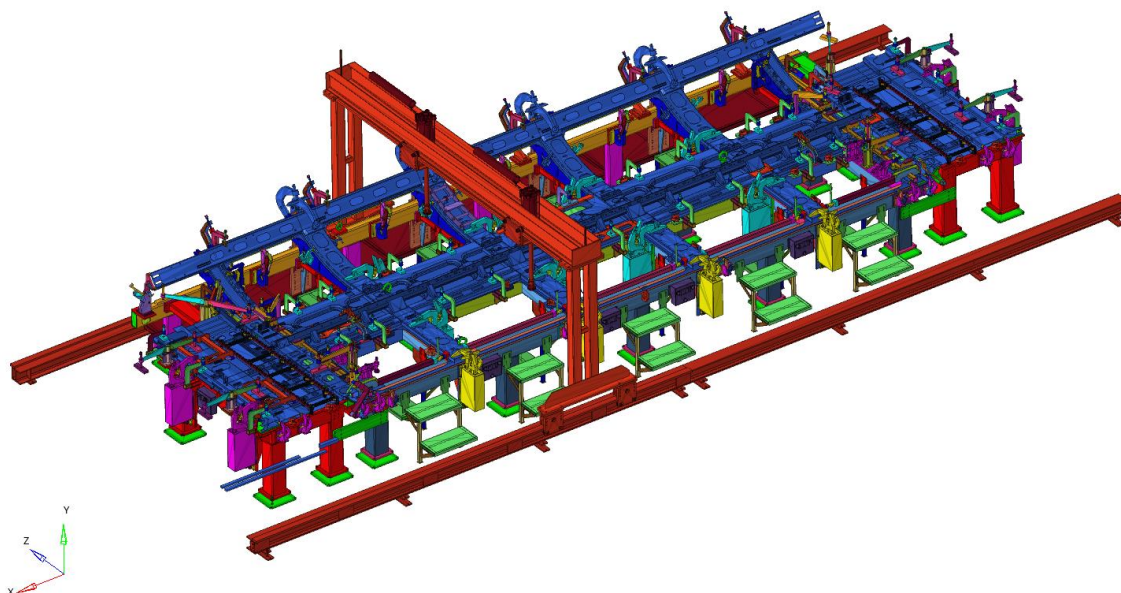
Tab. 6. Przemieszczenia w modelu po zakończonej symulacji procesu

Nr przypadku	Śr. przemieszczenie [mm]	Przemieszczenie po procesie [mm]
1	1.68	1.82
2	1.62	1.82
3	1.47	1.77
Różnica między min i max wartością	14.2%	2.8%

Jak można zauważyć na podstawie przeprowadzonych testów kolejność spawania ma wpływ na uzyskane przemieszczenia. Badana próbka jest niewielka a jej geometria nie jest złożona. Dla komponentów o złożonej strukturze, w których występuje wiele różnych odcinków spoin, wpływ kolejności spawania na uzyskaną wielkość deformacji może być znaczący. Z tego powodu w opracowanej metodzie uwzględniono możliwość analizy różnych przypadków przy uwzględnieniu różnej kolejności spawania.

5 Porównanie wyników optymalizacji rozmieszczenia podpór z testami rzeczywistymi dla komponentu o skomplikowanej geometrii

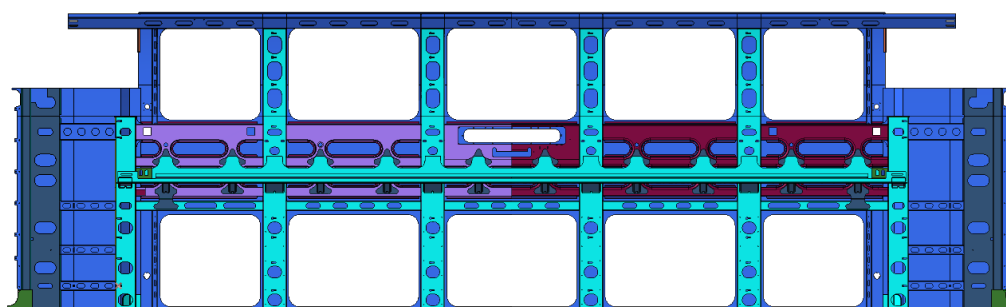
Przeprowadzone badania miały na celu weryfikację wyników symulacji numerycznych procesu spawania oraz optymalizacji przeprowadzonych w przypadku komponentu o skomplikowanej geometrii. Dla realizacji określonego celu wybrano poszycie boczne pojazdu kolejowego (ścianę boczną pojazdu) dla której podczas produkcji odnotowano problemy dotyczące nadmiernych deformacji. Jest to jeden z najbardziej złożonych komponentów, szczególnie trudny w produkcji z powodu swoich rozmiarów. Rozpatrywane poszycie ma 10264 mm długości oraz 3185 mm wysokości. Możliwości zmiany lokalizacji podpór oraz dodania nowych były mocno ograniczone ze względu na to, że komponent już był produkowany seryjnie a oprzyrządowanie wykonane. Wyniki uzyskane w efekcie symulacji numerycznych oraz optymalizacji zostały porównane z wynikami rzeczywistymi, zmierzonymi po procesie spawania na hali produkcyjnej dla odpowiednio zmodyfikowanego oprzyrządowania. Model numeryczny poszycia został stworzony na podstawie dostarczonej geometrii CAD poszycia. Lokalizacje oraz zastosowanie narzędzi mocujących oraz bazujących zostały szczegółowo odwzorowane zgodnie z modelem CAD oprzyrządowania spawalniczego przedstawionego na rys. 62. Dodatkowe punkty podparcia i mocowania przyjęte do procesu optymalizacji zostały dodane w analogiczny sposób. Warunki brzegowe dla procesu spawania zostały przyjęte na podstawie dokumentacji spawalniczej, uwzględniono rozmiar spoiny, kolejność oraz pozycje spawania. Warunki brzegowe oraz źródła ciepła zostały wprowadzone do modelu za pomocą zaproponowanej w pracy metodyki, opisanej we wcześniejszych rozdziałach pracy.



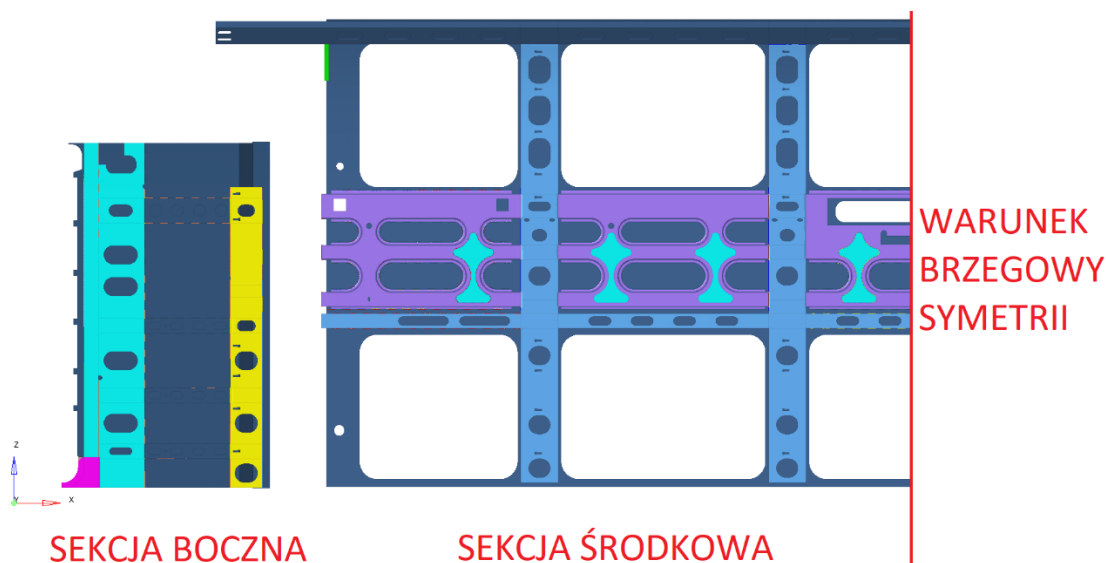
Rys. 62. Poszycie boczne zamocowane w oprzyrządowaniu spawalniczym

5.1 Model CAD poszycia

Poniżej na rys. 63 przedstawiono model geometryczny poszycia pojazdu kolejowego. Technologia spawania komponentu zakłada spawanie, w pierwszej kolejności, dwóch członów sekcji bocznej poszycia oddzielnie, a następnie ich połączenie z sekcją środkową w kolejnej operacji technologicznej. Z tego powodu w celu odwzorowania procesu i przeprowadzenia poprawnej symulacji zostały przygotowane dwa modele numeryczne odpowiadające poszczególnym członom poszycia. Na rys. 64 przedstawiono podział na sekcje, zaznaczono również warunek brzegowy symetrii. Z uwagi na fakt symetrii modelu w kierunku normalnym do X, w analizach uwzględniono jedynie połowę modelu MES. Aby odzwierciedlić ciągłość struktury w miejscu podziału sekcji środkowej za pomocą symetrycznego warunku brzegowego (odebranie możliwości przemieszczeń w kierunku X oraz obrotu względem osi Y i Z).

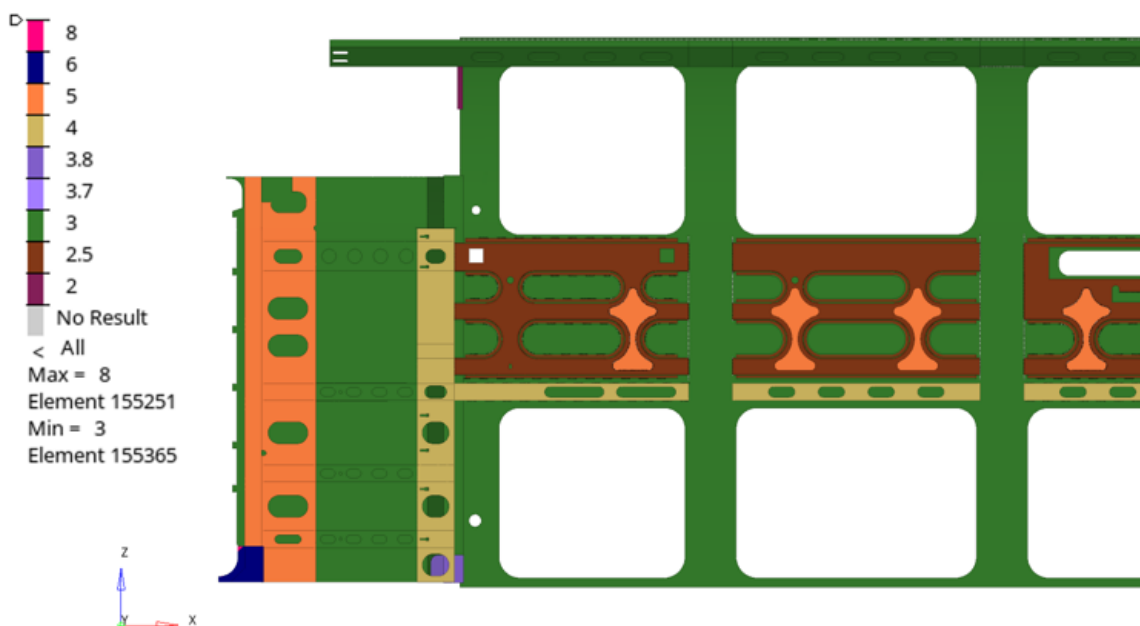


Rys. 63. Wizualizacja poszycia bocznego



Rys. 64. Podział poszycia na sekcje

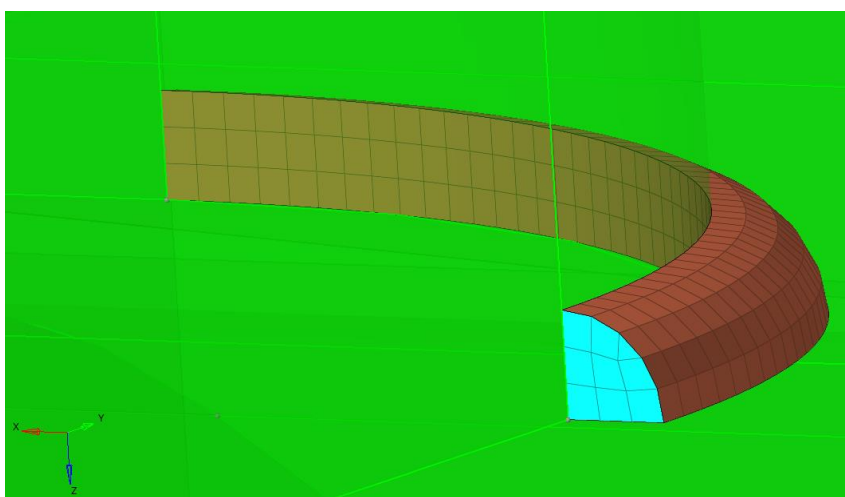
Na rys. 65 przedstawiono szczegółowy rozkład grubości dla poszczególnych części składowych poszycia.



Rys. 65. Rozkład grubości części składowych poszycia

5.2 Model spoiny

Model numeryczny spoiny został utworzony przy użyciu elementów sześciennych, ośmiowęzłowych (typu HEX 3D). Rozmiar spoin odpowiada dokumentacji spawalniczej i jest zależny od obszaru występowania danej spoiny (rys. 66). Siatki elementów skończonych wygenerowane dla spoin zostały połączone z siatką poszycia przy użyciu elementów kontaktowych, które przekazują odkształcenia oraz ciepło za pomocą zjawiska przewodzenia. Metodyka modelowania spoiny została przyjęta zgodnie z opisem zawartym w poprzednich rozdziałach pracy.



Rys. 66. Zdyskretyzowany fragment modelu – połączenie spoiny oraz modelu głównego

5.3 Materiały

Analizowane poszycie w całości jest wykonane ze stali S500MC. Przyjęte własności mechaniczne oraz termiczne zostały zestawione w tab. 7. Przyjęto takie same własności dla materiału rodzimego oraz spoin.

Tab. 7. Własności mechaniczne oraz termiczne przyjęte dla analiz

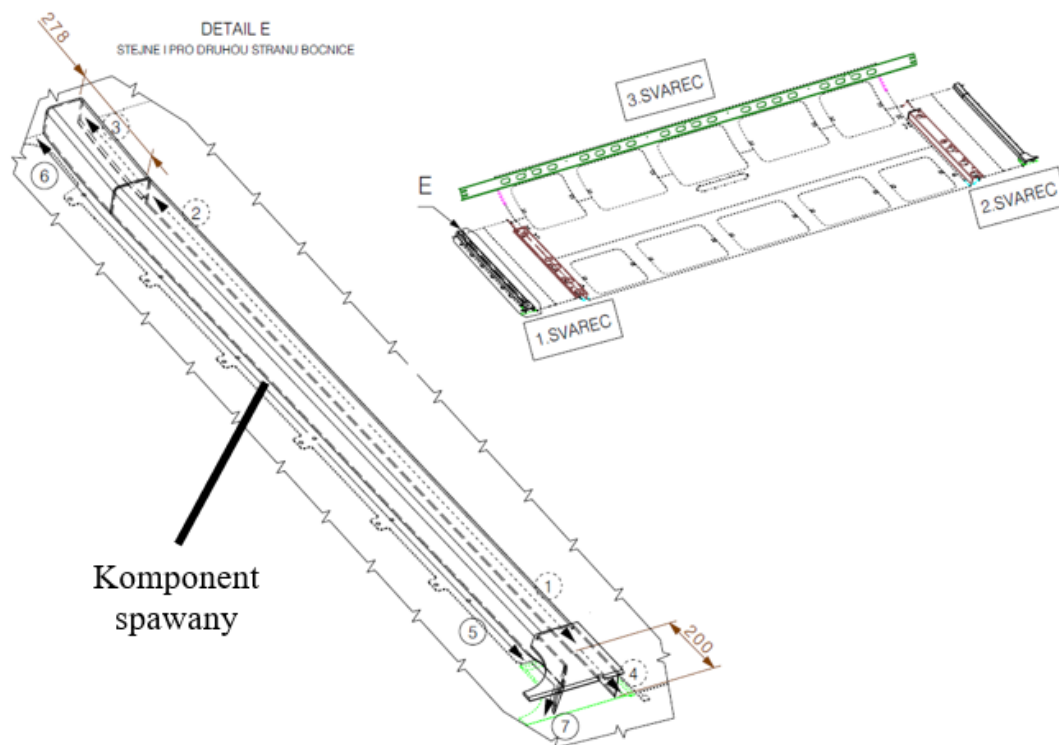
Moduł Younga [MPa]	210 000
Moduł Kirchoffa [MPa]	80 769
Współczynnik Poissona [-]	0.33
Gęstość [t/mm^3]	$7.85 \cdot 10^{-9}$
Liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej [$1/K$]	$1.2 \cdot 10^{-5}$
Temperatura otoczenia [°C]	20
Przewodność cieplna [$W/(m \cdot K)$]	49.81
Pojemność cieplna [$J/kg \cdot K$]	460
Współczynnik przekazywania ciepła materiału rodzimego [$W/(m^2 \cdot K)$]	30

5.4 Warunki brzegowe

Warunki brzegowe przyjęto zgodnie z dokumentacją spawalniczą, w której szczegółowo przedstawiono parametry, takie jak: prędkość spawania, pozycja spawania oraz ilość wprowadzonego ciepła. Pozycja, ilość wprowadzonego ciepła jak i rozmiar spoiny może się różnić w zależności od rodzaju złącza. Szczegółowe dane wymieniono w dalszej części pracy dla poszczególnych operacji spawania. Liniową prędkość spawania dla wszystkich spoin określono na 80 cm/min. Operację szepiania pominięto, gdyż termicznie ma pomijalny wpływ na odkształcenie struktury, w modelu numerycznym, przyjętym do analiz, uwzględniono przymocowanie odpowiednich komponentów do struktury.

5.5 Sekcja boczna – operacja nr 1 – schemat przebiegu optymalizacji

Poniżej na rys. 67 przedstawiono pierwszy cykl spawania dla sekcji bocznej. Kolejność i kierunki spawania zostały przyjęte zgodnie z założeniami na schemacie.



Rys. 67. Schemat kolejności spawania dla operacji nr 1, sekcja boczna

W tab. 8 znajduje się zestawienie obejmujące: numer spoiny, pozycję spawania oraz ilość wprowadzonego ciepła podczas procesu.

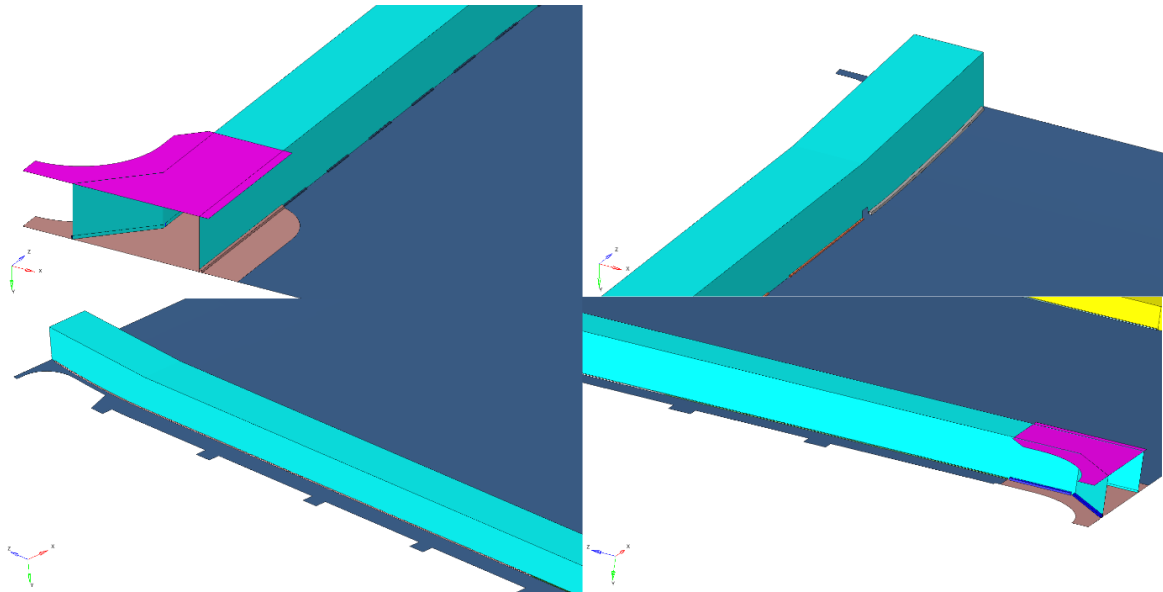
Tab. 8. Dane dotyczące procesu spawania dla operacji nr 1, sekcja boczna

Sekwencja spawania	WPS	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/cm]	Pozycja	Komentarz
1-2	317-K02-G22-031	5.5	PB	Spoina przerywana 18x50(50)
Rysunek spoiny wg WPS				
3	317-THY04-G22-031	15.5	PC	Spoina ciągła – 278 mm
Rysunek spoiny wg WPS				
4	317-K04-G22-031	9.8	PB	Spoina ciągła – 200 mm
Rysunek spoiny wg WPS				
5-6	317-K02-G22-031	5.5	PB	5 - Spoina ciągła – 900 mm 6 - Spoina ciągła – 1175 mm
Rysunek spoiny wg WPS				
7	317-THV05-G22-03	10.0	PC	Spoina ciągła – 225 mm
Rysunek spoiny wg WPS				

gdzie:

WPS – plan spawania,
PA – pozycja podolna spawania,
PB – pozycja naboczna spawania,
PC – pozycja naścienna spawania.

Model numeryczny przygotowany dla operacji 1 spawania sekcji bocznej zawiera fragment poszycia oraz słupek boczny (rys. 68).

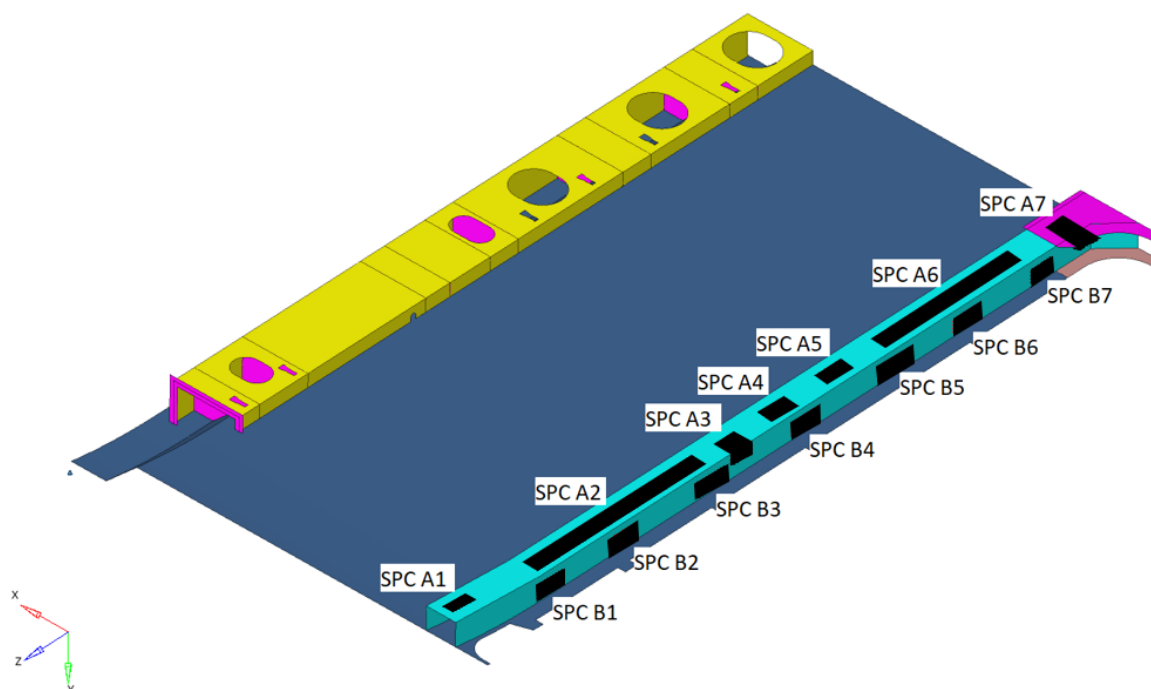


Rys. 68. Model numeryczny dla operacji spawania nr 1 sekcji bocznej

Przebieg procesu optymalizacji opisano na przykładzie sekcji bocznej dla operacji nr 1. Był to pierwszy projekt, w przypadku którego odbyło się wdrożenie opracowanego systemu w przedsiębiorstwie. Omawiany problem dotyczy poszycia, dla którego rozpoczęto wcześniej próby przy nieoptymalnym doborze punktów podparcia. Opracowany system zastosowano w celu wprowadzenia lepszych rozwiązań. Niektóre, wprowadzone wcześniej punkty mocowań, musiały pozostać niezmienione - z tego powodu możliwości związane z definicją nowych punktów podparcia i zamocowania lub zmiany dotychczasowych były ograniczone. W założeniu modyfikacja oprzyrządowania miała się odbyć w krótkim czasie i nie wiązać się z całkowitą jego przebudową. Z tego powodu na podstawie modelu oprzyrządowania zdefiniowano przestrzeń, w której można było zmodyfikować punkty bazowe lub je zastąpić. Na rys. 69 przedstawiono rozmieszczenie rozpatrywanych w procesie optymalizacji punktów mocowania słupka spawanego do struktury poszycia. Miejsca oznaczone (SPC-A-1, SPC-A-2, SPC-A-3, SPC-A-6, SPC-A-7, SPC-B-1, SPC-B-3, SPC-B-5, SPC-B-7) to podpory, które były zdefiniowane podczas procesu, stosowanego dotychczas w firmie. Miejsca oznaczone jako SPC-A-4, SPC-A-5, SPC-B-2, SPC-B-4, SPC-B-6 to dodatkowe możliwe obszary, w których można dodać podpory. W procesie optymalizacji założono ograniczenia dotyczące ilości punktów mocowania zależnie od podobszaru. W rozpatrywanym przypadku wydzielono dwa główne podobszary, jeden odpowiada górnej powierzchni słupka, gdzie założono występowanie maksymalnie 5 punktów podparcia oraz drugi podobszar, który odpowiada powierzchni bocznej słupka, dla którego założono występowanie 4-ciu punktów podparcia. Dodatkowe ograniczenie dotyczyło punktu oznaczonego jako SPC-A-7, jest to punkt, który odpowiada łapie dociskowej ustalającej wzmocnienie słupka. Z przyczyn ograniczeń technologicznych, ten

punkt podparcia musi być bezwzględnie zachowany (czyli został zachowany dla wszystkich możliwych przypadków).

Przyjętym kryterium optymalizacji była minimalizacja przemieszczenia, które jest sumą kwadratów przemieszczeń węzłowych rozpatrywanego komponentu (zgodnie z równaniem 4.1). Podparcie blachy poszycia zostało zrealizowane w formie łoża, do którego komponent został dociśnięty za pomocą balastów.



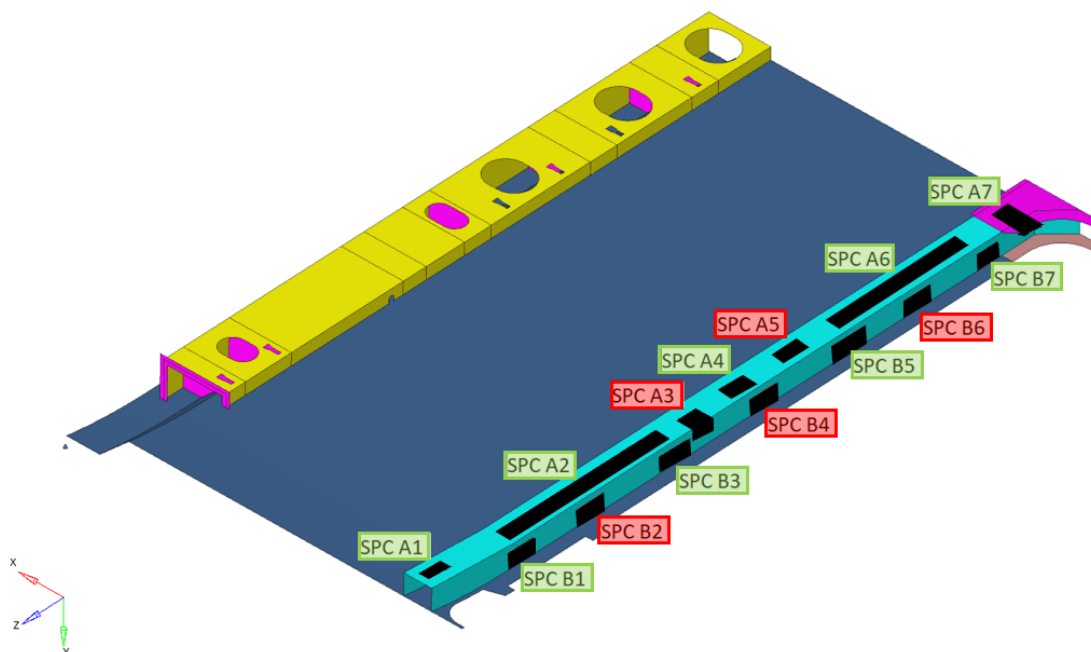
Rys. 69 Rozpatrywane punkty mocowań w procesie optymalizacji

System stworzył oraz porównał rozwiązania dla wszystkich możliwych kombinacji punktów podparcia przy uwzględnieniu nałożonych ograniczeń. Na rys. 70 przedstawiono uzyskane rozwiązanie dla omawianego przypadku. W skład optymalnego zestawu punktów mocowań, które zapewniają najmniejsze przemieszczenia w obrębie konstrukcji spośród wszystkich możliwych konfiguracji, wchodzi podpora SPC-A-1, SPC-A-2, SPC-A-4, SPC-A-6, SPC-A-7, SPC-B-1, SPC-B-3, SPC-B-5, SPC-B-7 (oznaczone kolorem zielonym). W wyniku przeprowadzonego procesu optymalizacji dla operacji nr 1 uzyskano informację, iż konfiguracja podpór wprowadzona na wcześniejszym etapie w dużej mierze pokrywa się z konfiguracją optymalną. zastąpienie punktu SPC-A-3 nowo zdefiniowanym punktem SPC-A-4. Takie rozwiązanie pozwoliło ograniczyć maksymalne przemieszczenia występujące w tej operacji o 5%. Uzyskane mapy przemieszczeń przedstawiono w podrozdziale (5.5.1).

W tabeli Tab. 9 zestawiono wartości funkcji celu dla trzech wybranych konfiguracji wyznaczonych przez algorytm.

Tab. 9 Wartości funkcji celu dla trzech wybranych przypadków

Nazwa przypadku	Przemieszczenie [mm]
SPC-A-1, SPC-A-2, SPC-A-4, SPC-A-6, SPC-A-7, SPC-B-1, SPC-B-3, SPC-B-5, SPC-B-7	0.84
SPC-A-2, SPC-A-3, SPC-A-4, SPC-A-5, SPC-A-7, SPC-B-1, SPC-B-4, SPC-B-6, SPC-B-7,	0.96
SPC-A-2, SPC-A-3, SPC-A-4, SPC-A-6, SPC-A-7, SPC-B-1, SPC-B-4, SPC-B-6, SPC-B-7,	1.58



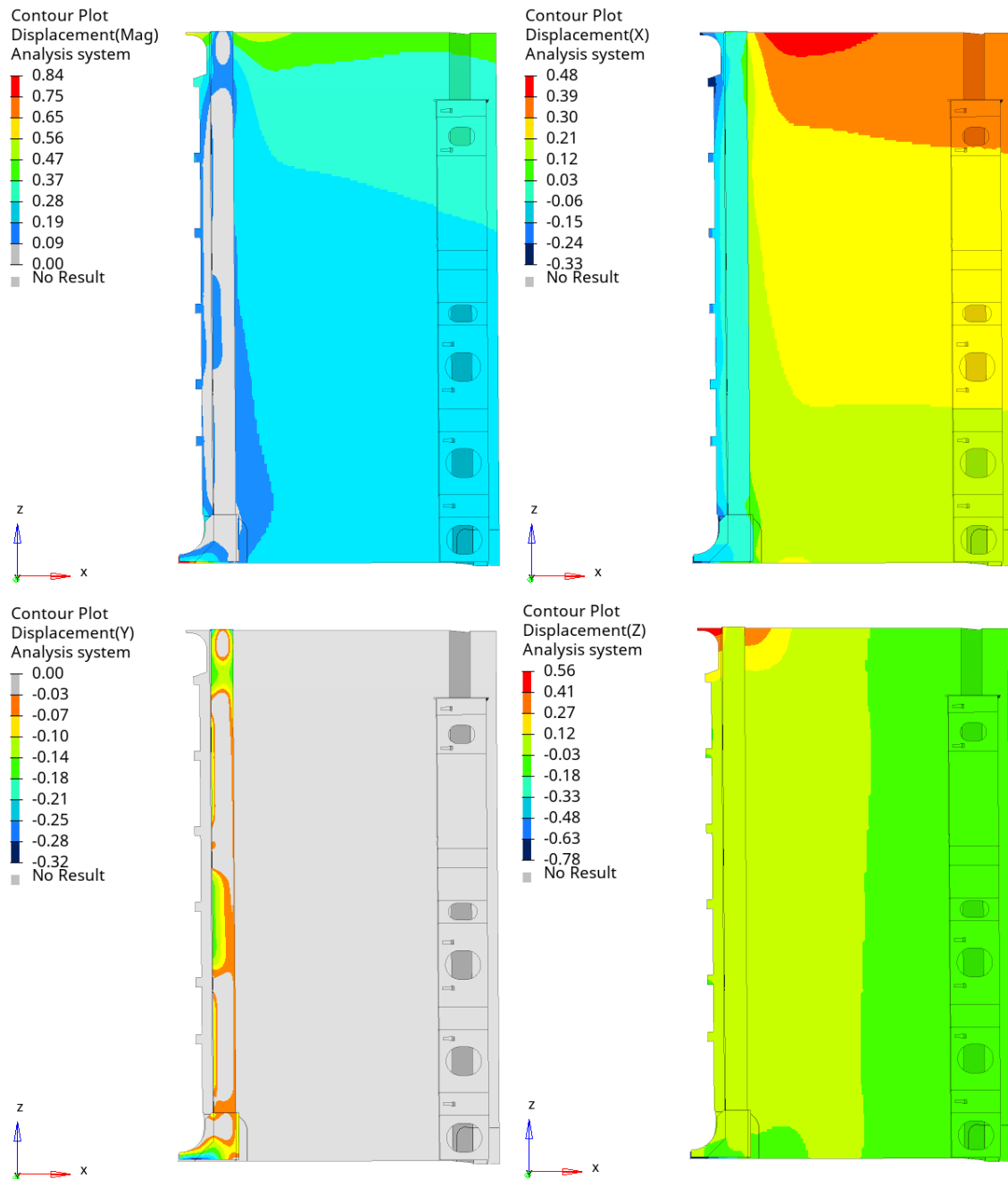
Rys. 70. Schemat podparcia komponentu po procesie optymalizacji (kolor zielony – podpory uwzględnione w najlepszym rozwiązaniu, kolor czerwony – podpory odrzucone)

Omówiony schemat działania został przyjęty dla każdej z przedstawionych w dalszej części pracy operacji spawania. Z powodu złożoności opisu w następnych rozdziałach pokazywane jest rozwiązanie uzyskane po zakończonym procesie optymalizacji. Rozkład przemieszczeń z każdej operacji dla wyznaczonego schematu podparcia jest uwzględniany w następnej operacji jako postać wyjściowa do dalszych analiz. W procesie optymalizacji, dla każdej operacji oddzielnie, poszukiwany jest optymalny schemat podparcia, dla którego uzyskiwana jest minimalna wartość funkcji kryterialnej.

5.5.1 Sekcja boczna – operacja nr 1 – wyniki obliczeń

Na rys. 71 przedstawiono wyniki analiz dla operacji nr 1. Zaprezentowano wyniki przemieszczeń w kierunkach X, Y oraz Z oraz wynik przedstawiający wektorowe złożenie przemieszczeń osiowych. Największe przemieszczenia zaobserwowano w lewym dolnym rogu złożenia. Wynika to z większego rozmiaru spoiny w porównaniu do reszty złożenia i tym samym koncentracją dużej mocy cieplnej na małym obszarze. Otrzymana wartość przemieszczenia wyniosła 0.84 mm. Wartość jest stosunkowo mała, ponieważ komponent pozostaje w pochwyceniu do dalszych operacji spawania. W ramach testu uwolniono konstrukcje z więzów, otrzymane przemieszczenie wyniosło 2.29 mm i odnotowano je na

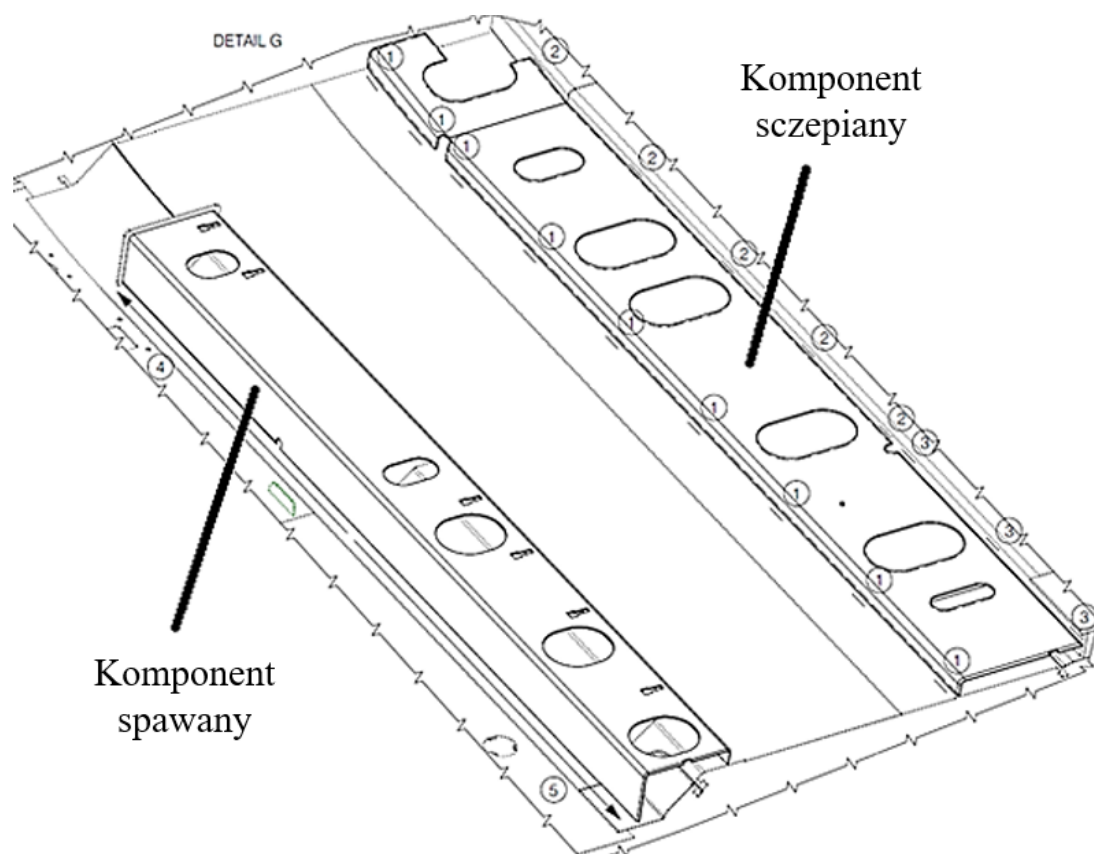
poszyciu. Warto jednak zaznaczyć, że w kolejnych operacjach dodawane są wzmocnienia, które usztywniają konstrukcję ograniczając deformację poszycia po uwolnieniu z więzów.



Rys. 71. Przemieszczenia występujące w konstrukcji po operacji spawania nr 1 sekcji bocznej [mm]

5.6 Sekcja boczna – operacja nr 2 – warunki brzegowe

Podczas operacji spawania nr 2, do złożenia zostają dodane nowe komponenty. Spoiny oznaczone jako 1, 2 oraz 3 są spoinami szczepnymi. Właściwe spoiny oznaczono numerem 4 oraz 5 (rys. 72).



Rys. 72. Schemat kolejności spawania dla operacji nr 2, sekcja boczna

W tab. 10 znajduje się zestawienie obejmujące: numer spoiny, pozycję spawania oraz ilość wprowadzonego ciepła podczas procesu.

Tab. 10. Dane dotyczące procesu spawania dla operacji nr 2, sekcja boczna

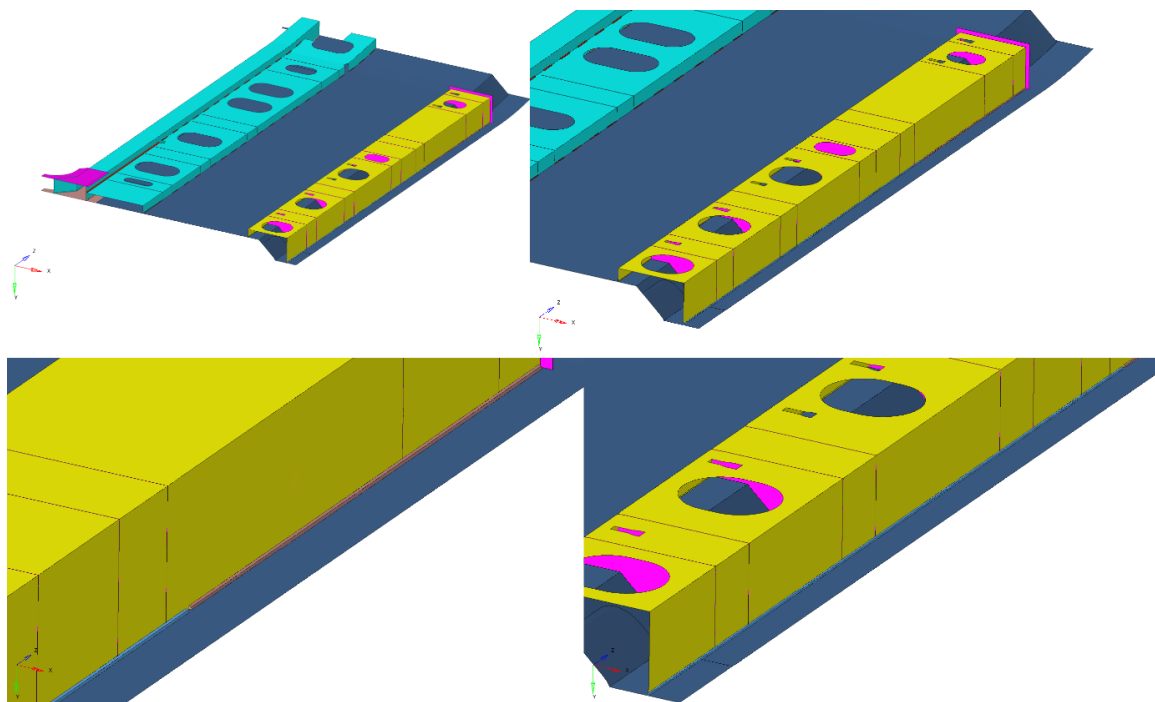
Sekwencja spawania	WPS	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/cm]	Pozycja	Komentarz
4, 5	317-PK03-G22-031	4.5	PB	Spoina ciągła – 1380 mm
Rysunek spoiny wg WPS				

gdzie:

WPS – plan spawania,

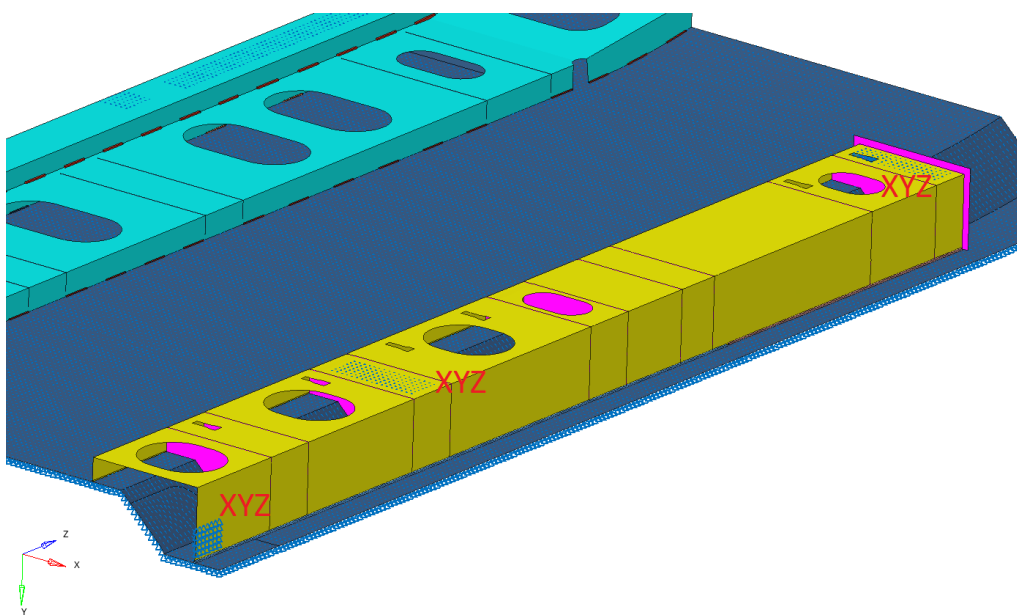
PB – pozycja naboczna spawania.

Model numeryczny przygotowany dla operacji nr 2 spawania sekcji bocznej zawiera fragment poszycia z poprzedniego kroku z dodanym wzmocnieniem pionowym (rys. 73).



Rys. 73. Model numeryczny dla operacji spawania nr 2 sekcji bocznej

Na rys. 74 przedstawiono rozmieszczenie punktów mocowania oraz sposób podparcia (odebrane stopnie swobody w poszczególnych kierunkach) uzyskane po procesie optymalizacji.

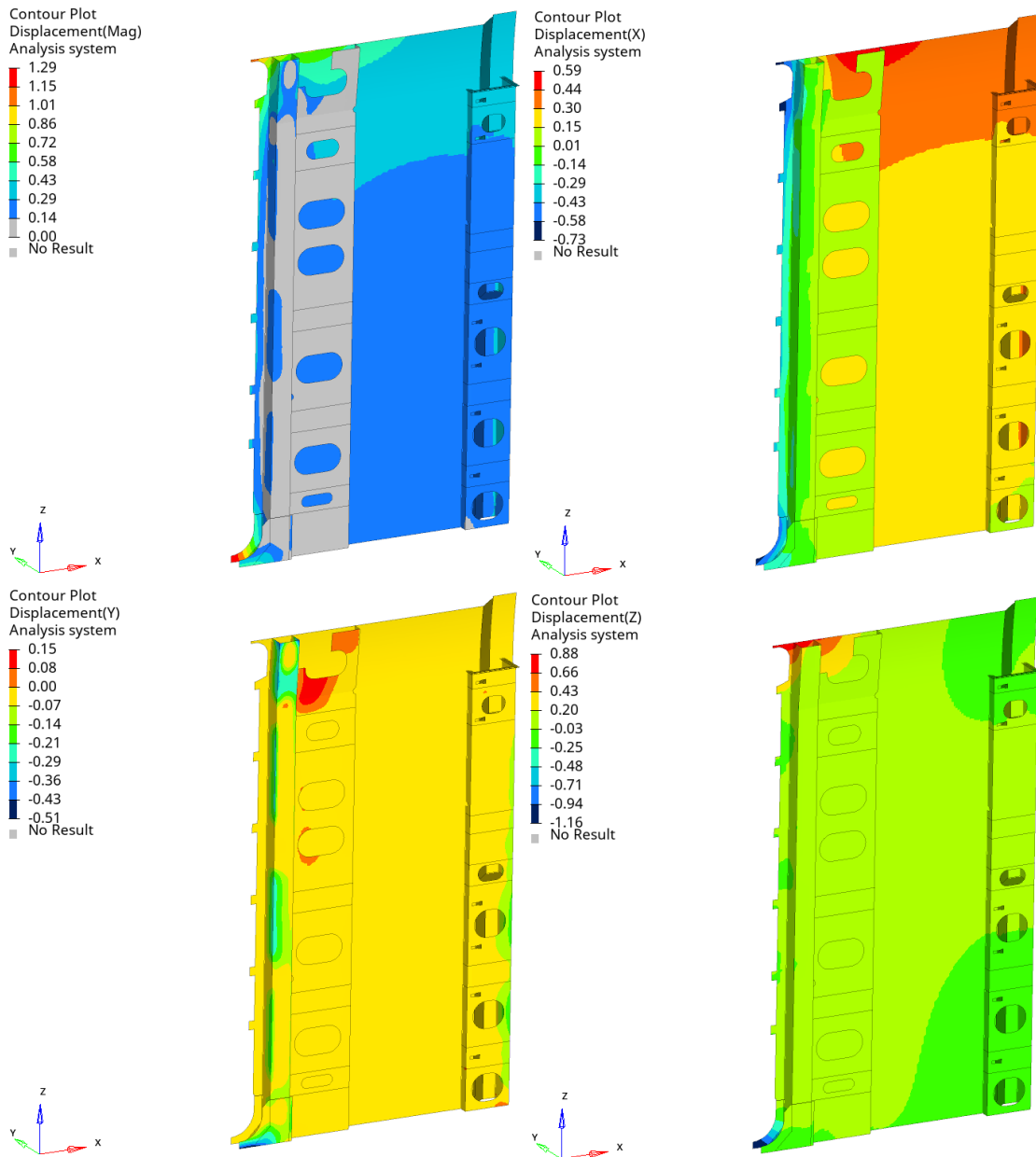


Rys. 74. Schemat podparcia komponentu

5.6.1 Sekcja boczna – operacja nr 2 – wyniki obliczeń

Na rys. 75 przedstawiono wyniki obliczeń dla operacji 2. Rozkłady zawierają przemieszczenia wypadkowe, będące złożeniem przemieszczeń w kierunkach X, Y oraz Z. Dodatkowo pokazano przemieszczenia oddzielnie dla poszczególnych kierunków. Największe przemieszczenie (1,29 mm) występuje w lewym górnym narożniku konstrukcji

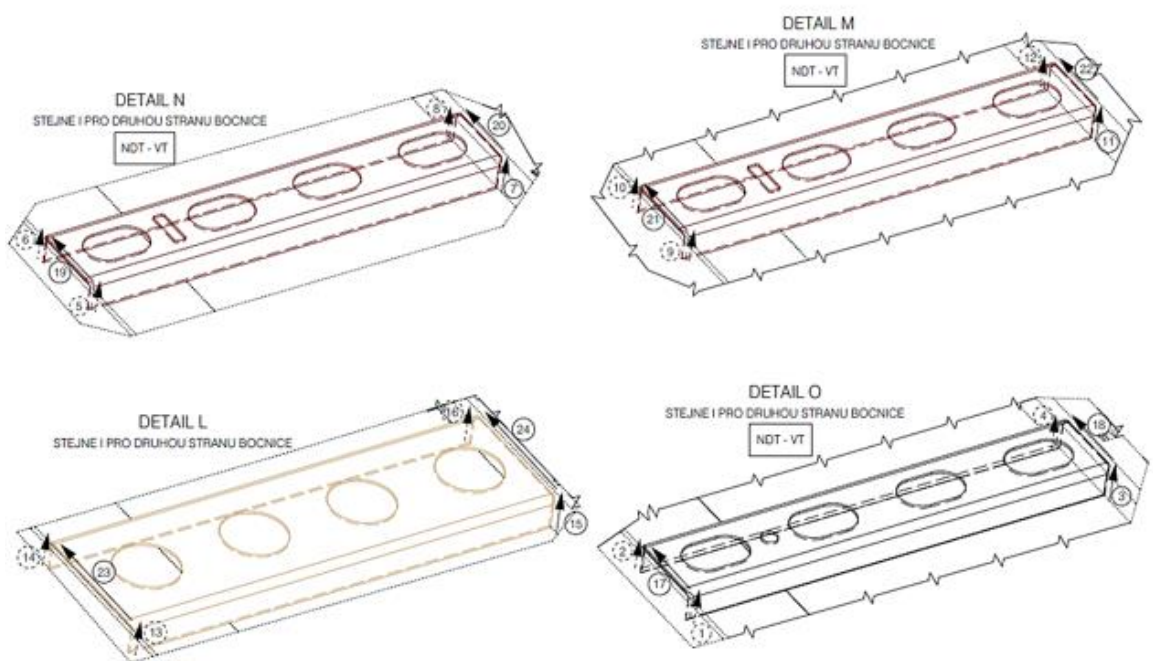
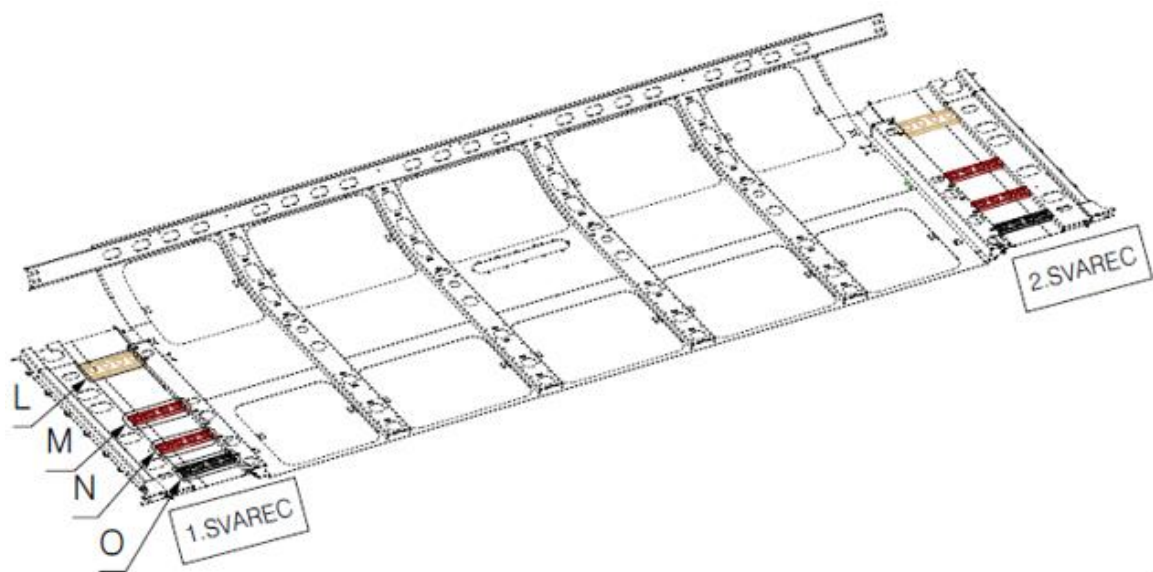
i wynika z braku podparcia w kierunkach Z oraz Y. Wyliczone przemieszczenie jest stosunkowo niewielkie i mieści się w ogólnie przyjętych tolerancjach.



Rys. 75. Przemieszczenia występujące w konstrukcji po operacji spawania nr 2 sekcji bocznej [mm]

5.7 Sekcja boczna – operacja nr 3 – warunki brzegowe

Kolejną operacją technologiczną jest dodanie wzmocnień poprzecznych L, M, N, O (rys. 76). Wzmocnienia łączone są wyłącznie krótszymi krawędziami do istniejących już profili pionowych. Proces spawania dłuższej krawędzi do poszycia uwzględniono w kolejnej operacji.



Rys. 76. Schemat kolejności spawania dla operacji nr 3, sekcja boczna

W tab. 11 znajduje się zestawienie obejmujące: numer spoiny, pozycję spawania oraz ilość wprowadzonego ciepła podczas procesu.

Tab. 11. Dane dotyczące procesu spawania dla operacji nr 3, sekcja boczna

Sekwencja spawania	WPS	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/cm]	Pozycja	Komentarz
1-12	317-THV03-G22-031	15.5	PF	Spoina ciągła – 38 mm

Rysunek spoiny wg WPS				
13-16	317-K03-G22-031	6.0	PF	Spoina ciągła – 38 mm
Rysunek spoiny wg WPS				
17-22	317-THS03-G22-031	11.0	PA	Spoina ciągła – 167 mm
Rysunek spoiny wg WPS				
23-24	317-THS02-G22-031	11.0	PA	Spoina ciągła – 167 mm
Rysunek spoiny wg WPS				

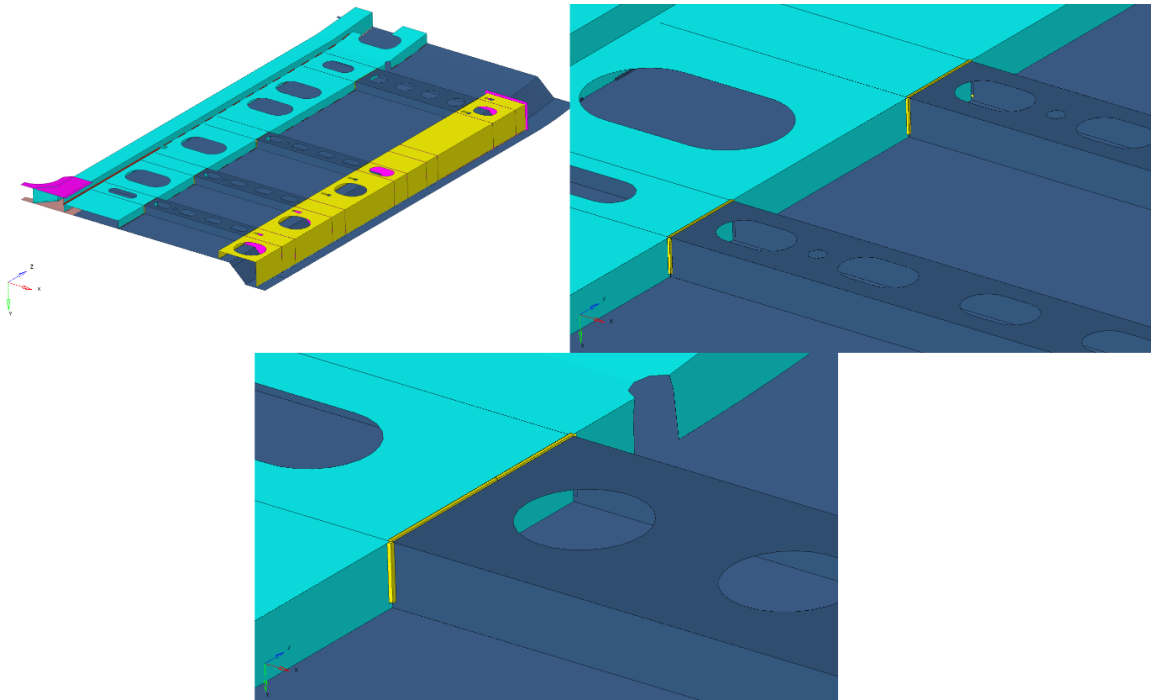
gdzie:

WPS – plan spawania,

PA – pozycja podolna spawania,

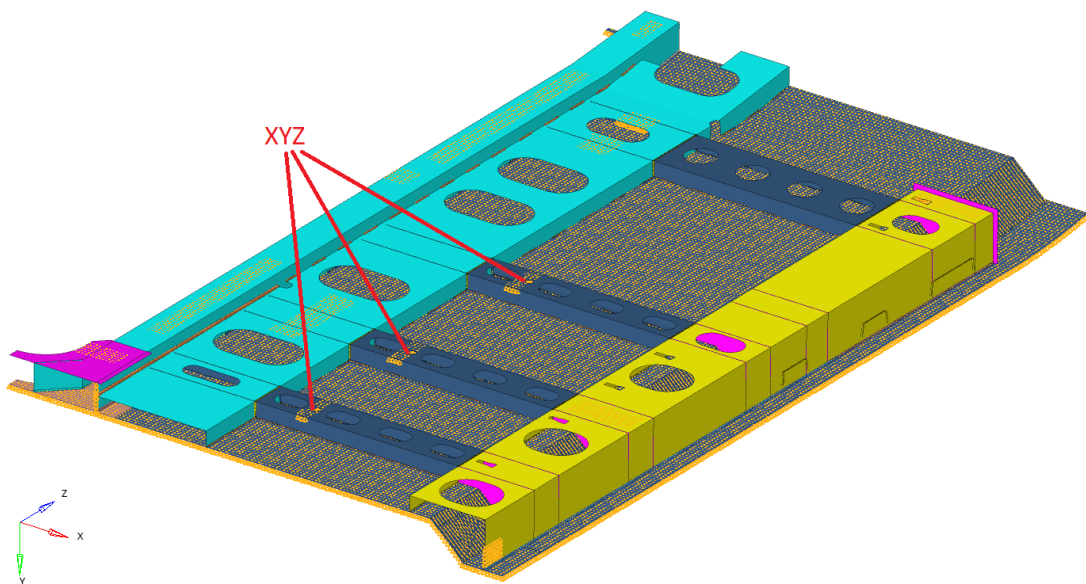
PF – pozycja pionowa z dołu do góry spawania.

Model numeryczny przygotowany dla operacji nr 3 spawania sekcji bocznej zawiera fragment poszycia z poprzedniego kroku z dodanym wzmocnieniem poprzecznym oraz spoiny opisane powyżej (rys. 77).



Rys. 77. Model numeryczny dla operacji spawania nr 3 sekcji bocznej

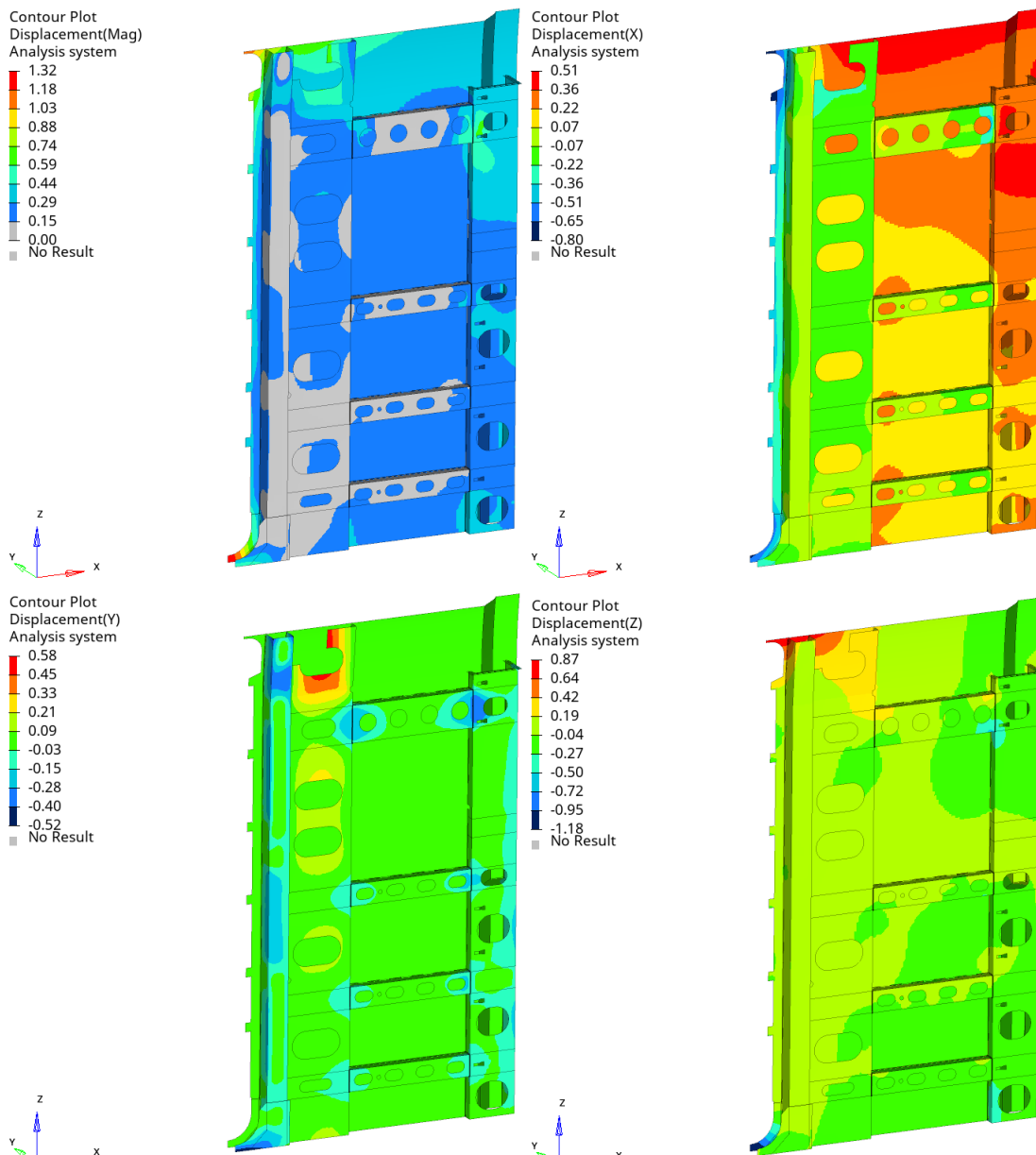
Poniżej na rys. 78 przedstawiono rozmieszczenie punktów mocowania podtrzymujących montowane wzmocnienia, punkty zostały dodane do przyrządu po procesie optymalizacji.



Rys. 78. Schemat podparcia komponentu

5.7.1 Sekcja boczna – operacja nr 3 – wyniki obliczeń

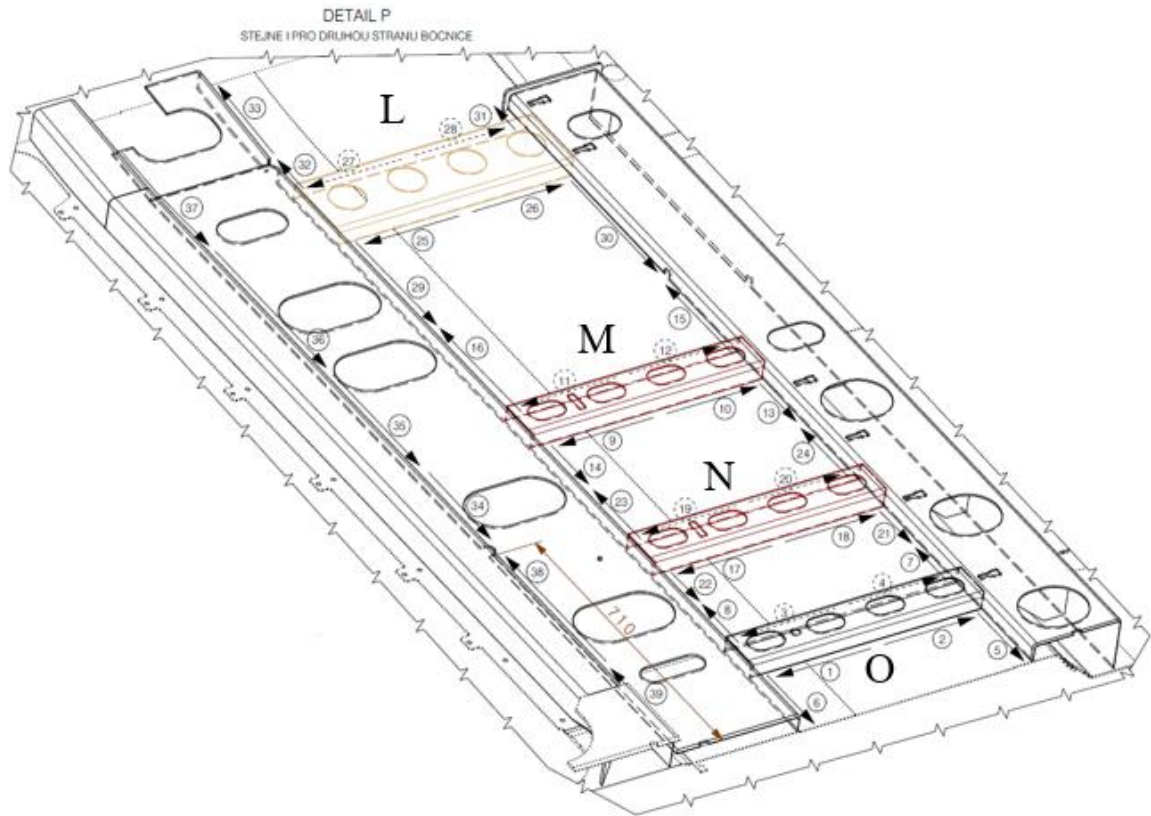
Do wyników przemieszczeń uzyskanych w operacji nr 3 zostały dodane przemieszczenia z poprzednich operacji przy użyciu funkcji liniowej superpozycji. W analizowanym przypadku spawania profili poprzecznych do profili pionowych zauważalna jest tendencja do „ściągnięcia” ich do siebie, co widać na rozkładzie przemieszczeń w osi X oraz częściowo w osi Z. (rys. 79). Maksymalne przemieszczenie wyniosło 1,32 mm.



Rys. 79. Przemieszczenia występujące w konstrukcji po operacji spawania nr 3 sekcji bocznej [mm]

5.8 Sekcja boczna – operacja nr 4 – warunki brzegowe

Po połączeniu wzmocnień poprzecznych do profili pionowych (L, M, N, O) następnym krokiem jest wykonanie spoin łączących je do struktury poszycia. Dodatkowo w operacji nr 4 zostało uwzględnione pełne spawanie dodatkowego profilu pionowego (rys. 80).



Rys. 80. Schemat kolejności spawania dla operacji nr 4, sekcja boczna

W tab. 12 znajduje się zestawienie obejmujące: numer spoiny, pozycję spawania oraz ilość wprowadzonego ciepła podczas procesu.

Tab. 12. Dane dotyczące procesu spawania dla operacji nr 1, sekcja boczna

Sekwencja spawania	WPS	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/cm]	Pozycja	Komentarz
1-4	317-THY02+K02-G22-031	6.5	PC+PB	Spoina ciągła – 273 mm
Rysunek spoiny wg WPS	317-THV05-G22-031			
5; 6; 7; 13; 15; 21; 24	317-K02-G22-031	5.5	PB	5-6; spoina ciągła – 190 mm 7 – spoina ciągła – 135 mm 13 – spoina ciągła – 170 mm

				15 – spoina ciągła – 255 mm
				21 – spoina ciągła – 130 mm
				24 – spoina ciągła – 185 mm
Rysunek spoiny wg WPS				
8; 22	317-K02-G22-031	5.5	PB	Spoina przerywana 3x50(60)
Rysunek spoiny wg WPS				
9-12; 17-20; 25-28	317-K02-G22-031	5.5	PB	Spoina przerywana 6x50(60)
Rysunek spoiny wg WPS				
14; 23	317-K02-G22-031	5.5	PB	Spoina przerywana 4x50(50)
Rysunek spoiny wg WPS				
16; 29	317-K02-G22-031	5.5	PB	Spoina przerywana 6x50(65)
Rysunek spoiny wg WPS				
30; 31	317-THY02+K02-G22-031	6.5	PB+PC	30 - Spoina ciągła – 355 mm
				31 – spoina ciągła – 70 mm

Rysunek spoiny wg WPS				
32	317-K02-G22-031	5.5	PB	Spoina ciągła – 55 mm
Rysunek spoiny wg WPS				
33	317-K02-G22-031	5.5	PB	Spoina przerywana 3x50(50)
Rysunek spoiny wg WPS				
34-37	317-K02-G22-031	5.5	PB	Spoina przerywana 14x50(50)
Rysunek spoiny wg WPS				
38; 39	317-THV05-G22-031	7.0	PA	Spoina ciągła – 710 mm

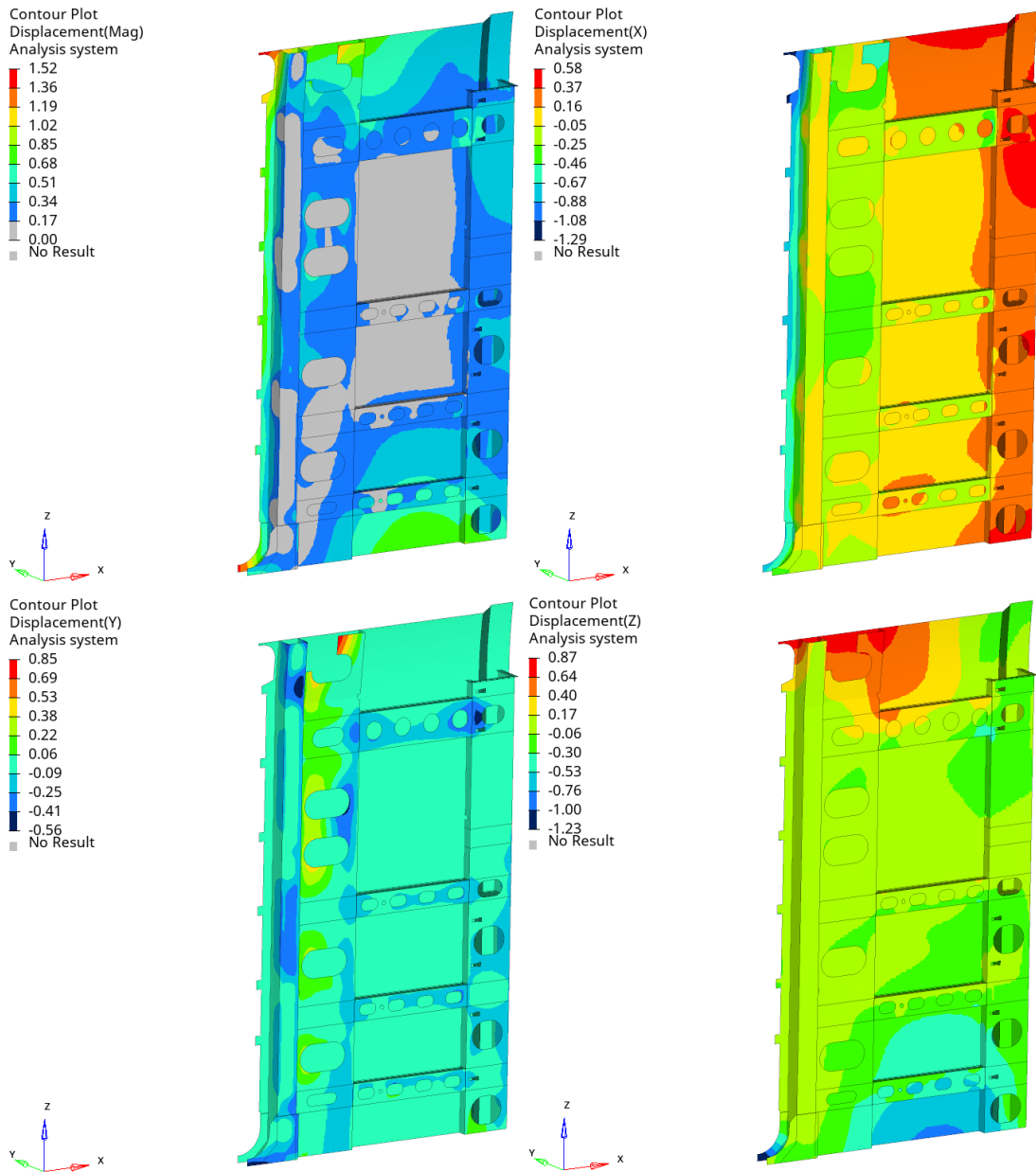
gdzie:

- WPS – plan spawania,
- PA – pozycja podolna spawania,
- PB – pozycja naboczna spawania,
- PC – pozycja naścienna spawania.

Schemat podparcia modelu pozostaje analogiczny do poprzedniej operacji.

5.8.1 Sekcja boczna – operacja nr 4 – wyniki obliczeń

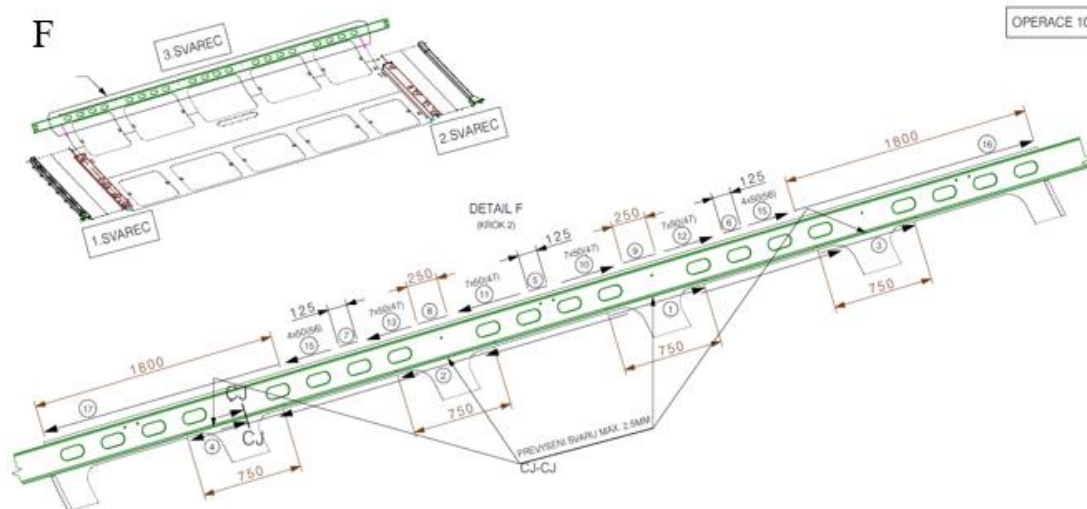
Przemieszczenia uzyskane po operacji spawania nr 4 zostały zsumowane z przemieszczeniami uzyskanymi po operacji spawanie nr 3. Wyniki przedstawiono na rys. 81. Maksymalne przemieszczenia wypadkowe (1.52 mm) oraz w osi X (1.29 mm) wynikają z braku podparcia wolnych krawędzi konstrukcji. Tendencja do „ściągnięcia” profili poprzecznych jest zauważalnie mniejsza. Konstrukcja sekcji bocznej po procesie spawania zgodnie z przedstawionym powyżej schematem operacji, wraz z uzyskanym rozkładem przemieszczeń, zostanie dołączona do sekcji środkowej, co zostanie zaprezentowane w dalszej części pracy.



Rys. 81. Przemieszczenia występujące w konstrukcji po operacji spawania nr 4 sekcji bocznej [mm]

5.9 Sekcja środkowa – operacja nr 1 – warunki brzegowe

Na rys. 82 przedstawiono pierwszą operację spawania dla sekcji środkowej. W operacji spawania nr 1 sekcji środkowej do poszycia spawane jest wzmocnienie poprzeczne F. Kolejność i kierunki spawania zostały przyjęte zgodnie z założeniami przedstawionymi na schemacie (rys. 82).



Rys. 82. Schemat kolejności spawania dla operacji nr 1, sekcja środkowa

W tab. 13 znajduje się zestawienie obejmujące: numer spoiny, pozycję spawania oraz ilość wprowadzonego ciepła podczas procesu.

Tab. 13. Dane dotyczące procesu spawania dla operacji nr 1, sekcja środkowa

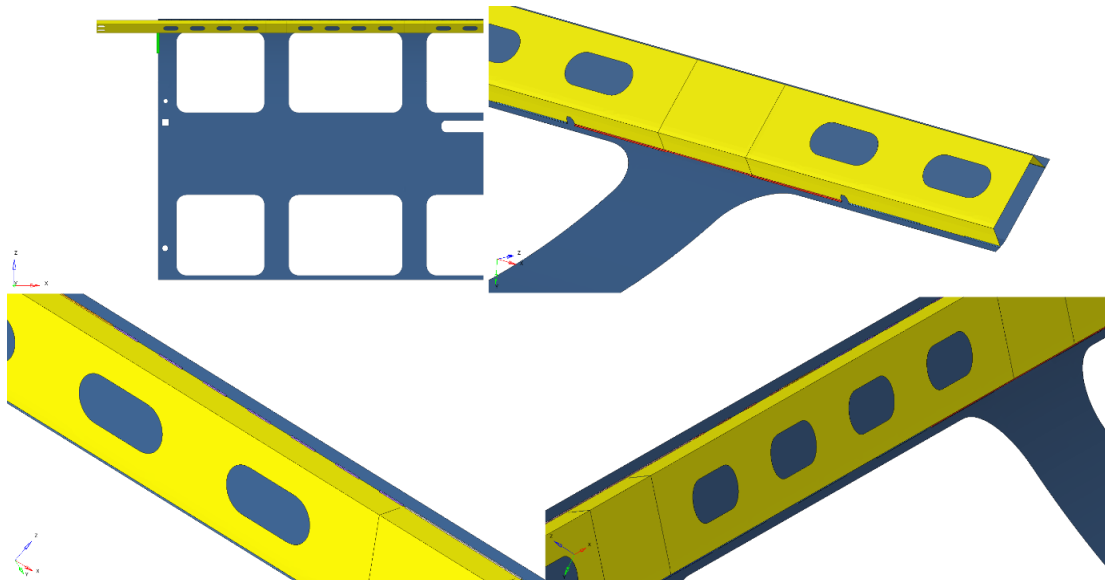
Sekwencja spawania	WPS	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/cm]	Pozycja	Komentarz
1-4	317-THV03-G22-031	15.5	PC	Spoina ciągła – 750 mm
Rysunek spoiny wg WPS				
5-17	317-K02-G22-031	5.5	PB	Precyzyjne wymiary spoin przedstawione za rysunku powyżej
Rysunek spoiny wg WPS				

gdzie:

WPS – plan spawania,

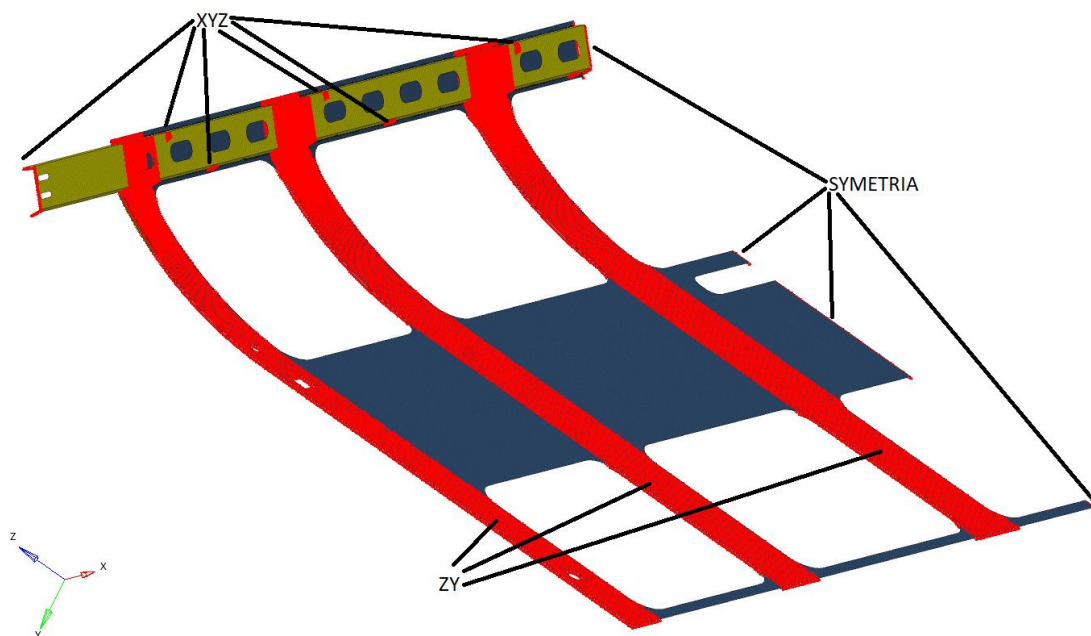
PB – pozycja naboczna spawania,
PC – pozycja naścienna spawania.

Model numeryczny przygotowany dla operacji nr 1 spawania sekcji środkowej zawiera poszycie dedykowane dla tej części konstrukcji z dodanym wzmocnieniem poprzecznym (rys. 83).



Rys. 83. Model numeryczny dla operacji spawania nr 1 sekcji środkowej

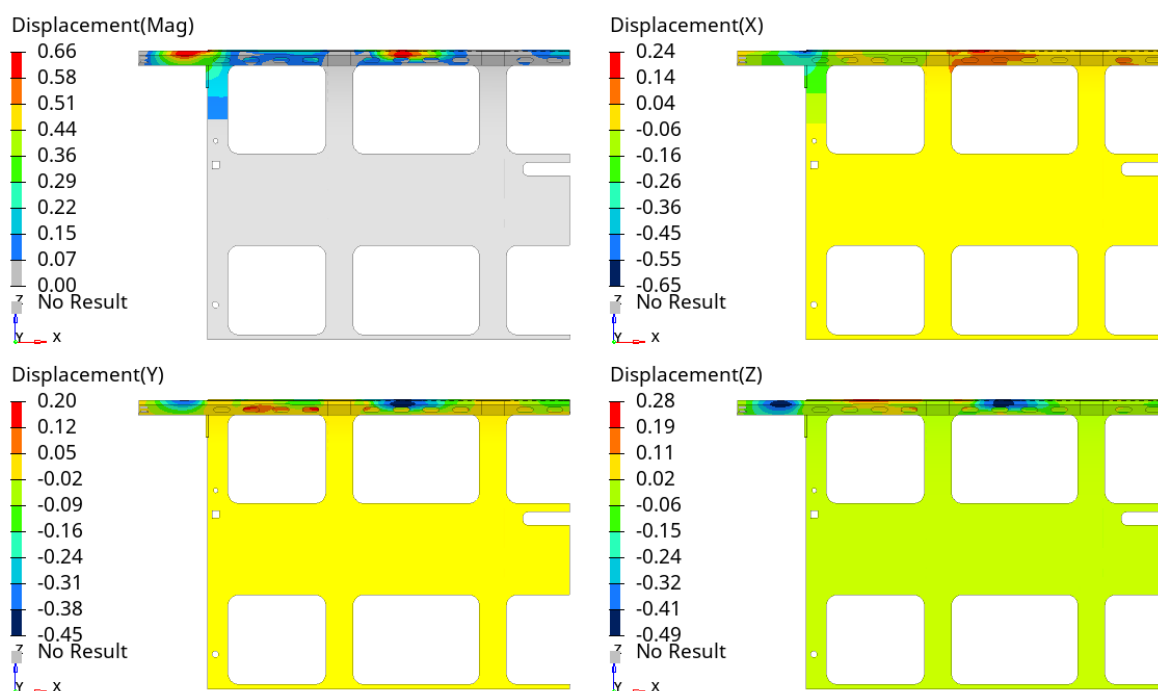
Poniżej na rys. 84 przedstawiono warunki brzegowe podparcia uzyskane po procesie optymalizacji



Rys. 84. Schemat podparcia komponentu (odebrano stopnie swobody w wyszczególnionych kierunkach)

5.9.1 Sekcja środkowa – operacja nr 1 – wyniki obliczeń

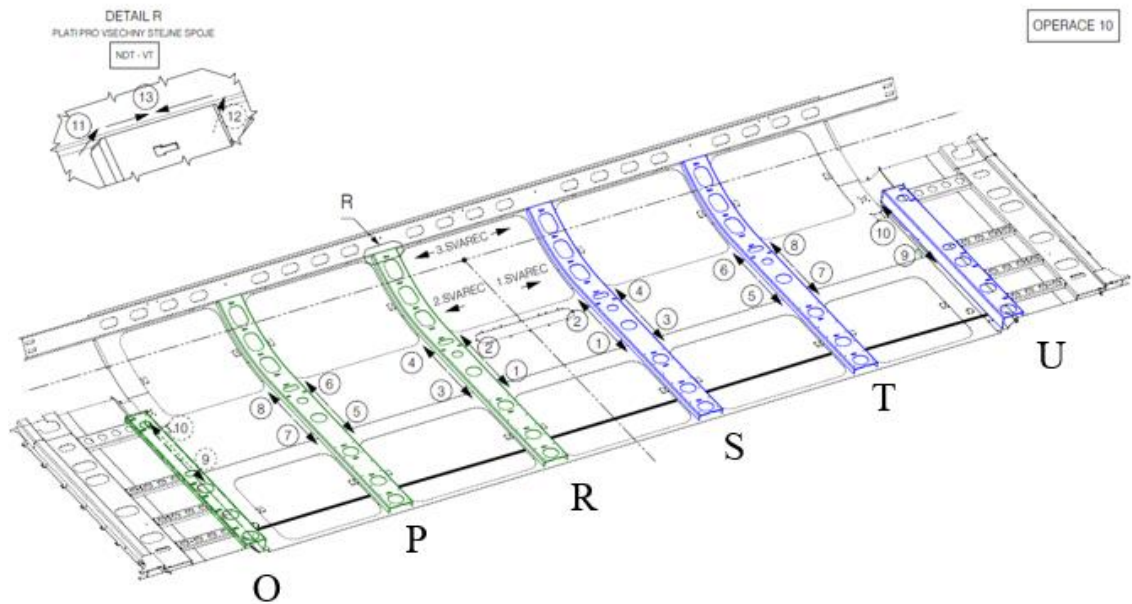
Na rys. 85 przedstawiono pierwszą operację spawania dla sekcji środkowej. Największą podatnością na odkształcenia cechują się obszary ponad środkowym wycięciem przeznaczonym na montaż okna oraz skrajny lewy obszar obejmujący wystający profil. Profil ten jest podparty na końcu, stąd tendencja do większego ugięcia między lewą krawędzią ściany a podparciem wprowadzonym na krawędzi. Maksymalne przemieszczenie wyniosło 0,66 mm.



Rys. 85. Przemieszczenia występujące w konstrukcji po operacji spawania nr 1 sekcji środkowej [mm]

5.10 Sekcja środkowa – operacja nr 2 – warunki brzegowe

Kolejną operacją technologiczną jest dodanie wzmocnień pionowych O, P, R, S T, U (rys. 86). Wzmocnienia łączone są na całej długości zgodnie z kolejnością przedstawioną na schemacie.



Rys. 86. Schemat kolejności spawania dla operacji nr 2, sekcja środkowa

W tab. 14 znajduje się zestawienie obejmujące: numer spoiny, pozycję spawania oraz ilość wprowadzonego ciepła podczas procesu.

Tab. 14. Dane dotyczące procesu spawania dla operacji nr 2, sekcja środkowa

Sekwencja spawania	WPS	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/cm]	Pozycja	Komentarz
1-9	317-K02-G22-031	5.5	PB	Spoiny ciągłe - 416 mm każda
Rysunek spoiny wg WPS	317-K02-G22-031 			
10	317-THY03+K02-G22-031	6.5	PB+PC	Spoina ciągła - 416 mm
Rysunek spoiny wg WPS	317-THY03+K02-G22-031 			
11; 12	317-THV04-G22-031	15.5	PF	Spoiny ciągłe - 50 mm każda
Rysunek spoiny wg WPS	317-THV04-G22-031 			

13	317-THS04-G22-031	7.0	PA	Spoina ciągła – 2x120 mm
Rysunek spoiny wg WPS	<p style="text-align: center;">317-THS04-G22-031</p>			

gdzie:

WPS – plan spawania,

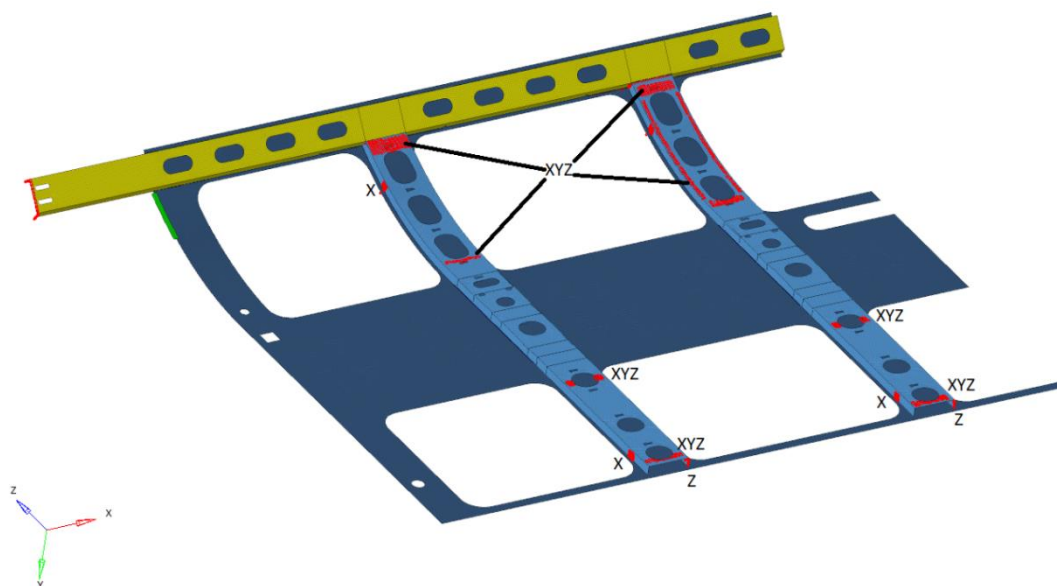
PA – pozycja podolna spawania,

PB – pozycja naboczna spawania,

PC – pozycja naścienna spawania,

PF – pozycja pionowa z dołu do góry spawania.

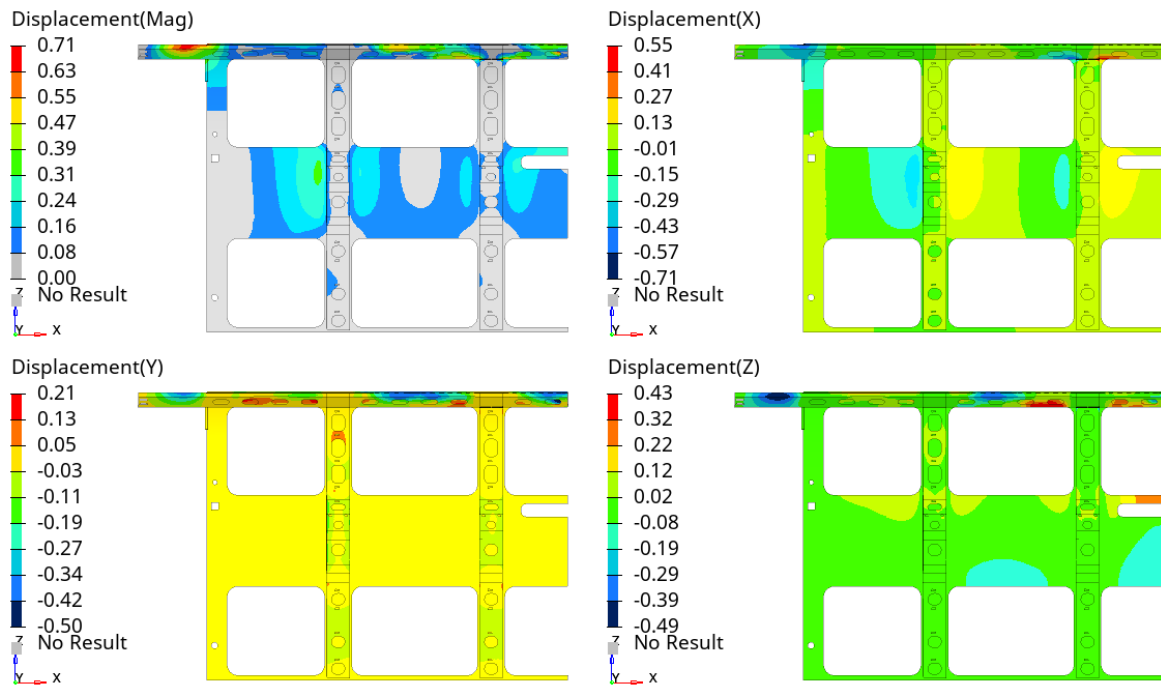
Do warunków brzegowych podparcia zdefiniowanych podczas pierwszej operacji dodano dodatkowe podpory wskazane przez algorytm optymalizacji (rys. 87).



Rys. 87. Schemat podparcia komponentu

5.10.1 Sekcja środkowa – operacja nr 2 – wyniki obliczeń

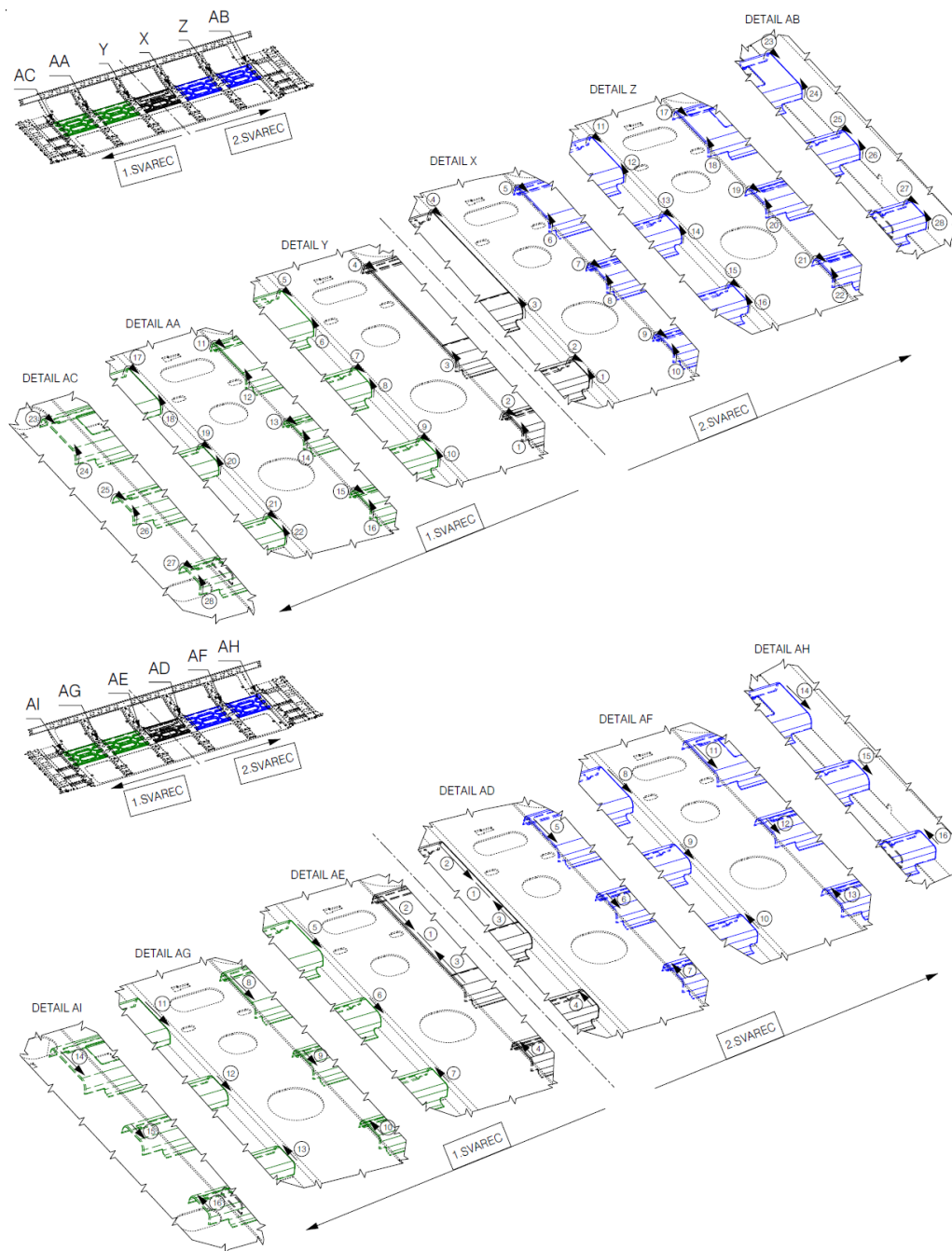
W operacji 2 dodano profile pionowe przyspawane do środkowej części poszycia. W osi X zaobserwowano tendencję do skurczu i odkształcenia kąowego blachy poszycia w kierunku spoiny, szczególnie w obszarze pomiędzy profilami pionowymi (rys. 88). Dodatkowo w osi Z, zauważalne jest przemieszczenie w miejscu zastosowania warunku brzegowego uwzględniającego symetrię układu, w przestrzeni między oknami, po prawej stronie modelu. Maksymalne przemieszczenie wyniosło 0,71 mm.



Rys. 88. Przemieszczenia występujące w konstrukcji po operacji spawania nr 2 sekcji środkowej [mm]

5.11 Sekcja środkowa – operacja nr 3 – warunki brzegowe

Operacja 3 uwzględnia proces spawania paneli środkowych do profili pionowych przyspawanych w operacji nr 2, które przedstawiono na rys. 88. W tej operacji następuje również łączenie sekcji bocznej z sekcją środkową. Szczegóły AC, AA, Y, X, Z oraz AB zawierają sekwencje spawania górnej oraz dolnej płaszczyzny boków paneli, jak przedstawiono na schemacie (rys. 89). Szczegóły AI, AG, AE, AD, AF oraz AH zawierają sekwencje spawania wzdłuż boków paneli, są to operacje wykonywane kolejno po sobie.



Rys. 89. Schemat kolejności spawania dla operacji nr 3, sekcja środkowa oraz boczna

W tab. 15 znajduje się zestawienie obejmujące: numer spoiny, pozycję spawania oraz ilość wprowadzonego ciepła podczas procesu.

Tab. 15. Dane dotyczące procesu spawania dla operacji nr 3, sekcja środkowa

Sekwencja spawania	WPS	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/cm]	Pozycja	Komentarz
1-28	317-THV2.5-G12-031	6.0	PB	Szczegóły AC, AA, Y Spoina ciągła – 40 mm każda

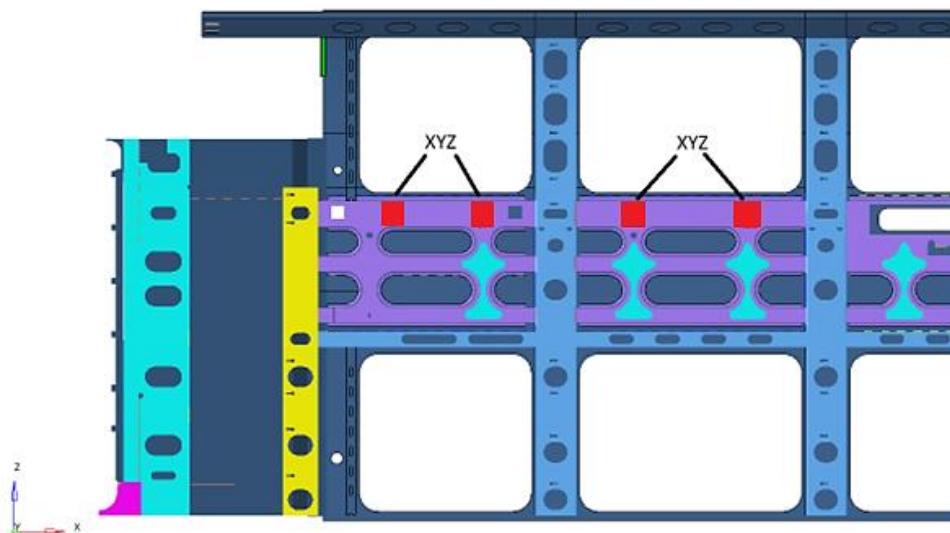
Rysunek spoiny wg WPS				
1-16	317-THV2.5-G12-031	6.0	PB	Szczegóły AI, AG, AE Spoina ciągła – 97 mm każda
Rysunek spoiny wg WPS				

gdzie:

WPS – plan spawania,

PB – pozycja naboczna spawania.

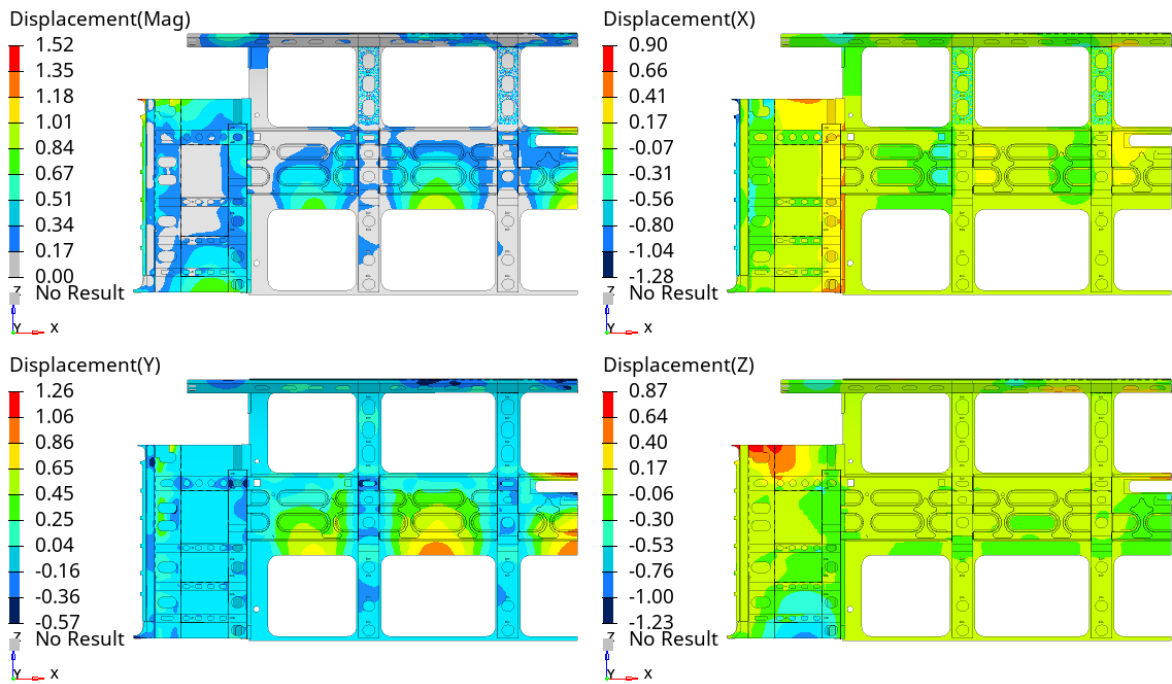
Do warunków brzegowych podparcia zdefiniowanych podczas poprzedniej operacji dodano dodatkowe punkty mocowania wskazane przez algorytm optymalizacji (rys. 90).



Rys. 90. Schemat podparcia komponentu

5.11.1 Sekcja środkowa – operacja nr 3 – wyniki obliczeń

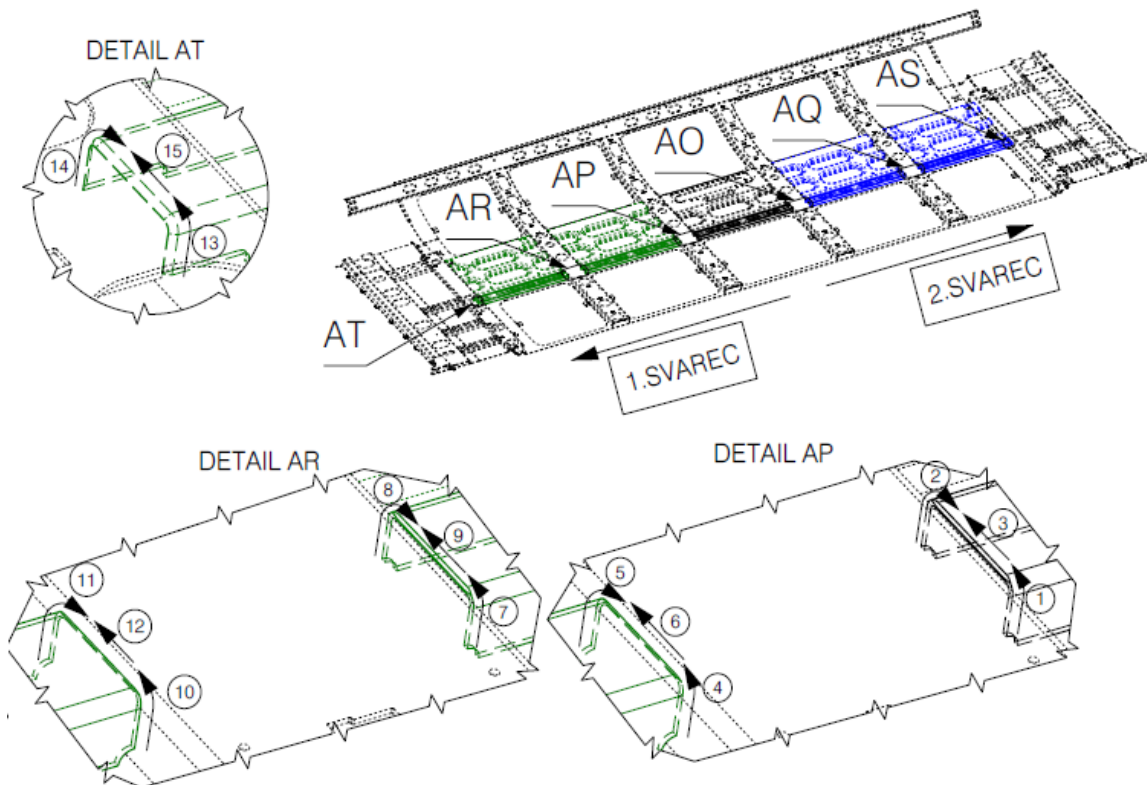
Przemieszczenia z operacji nr 3 zostały naniesione na wynikową superpozycję z operacji 2. Dodatkowo, z uwagi na fakt łączenia w tej operacji sekcji bocznej oraz środkowej, zostały naniesione wyniki z finalnego spawania sekcji bocznej. Nadal zauważalny jest skurcz poszycia w osi X, mimo wzmocnienia panelami środkowymi. W osi Y dochodzi do wybrzuszenia paneli w ich dolnych częściach (rys. 91).



Rys. 91. Przemieszczenia występujące w konstrukcji po operacji spawania nr 3 sekcji środkowej [mm]

5.12 Sekcja środkowa – operacja nr 4 – warunki brzegowe

Operacja 4 zawiera spawanie dodatkowych wzmacniających profili pod panelami do profili pionowych zaznaczonych na rysunku jako AR, AP, AO, AQ, AS. Na rys. 92 przedstawiono schemat procesu spawania wraz z kolejnością wykonania spoin.



Rys. 92. Schemat kolejności spawania dla operacji nr 4, sekcja środkowa oraz boczna

W tab. 16 znajduje się zestawienie obejmujące: numer spoiny, pozycję spawania oraz ilość wprowadzonego ciepła podczas procesu.

Tab. 16. Dane dotyczące procesu spawania dla operacji nr 4, sekcja środkowa

Sekwencja spawania	WPS	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/cm]	Pozycja	Komentarz
AP 1; 2; 4; 5 / AR 7; 8; 10; 11	317-K03-G22-031	6.0	PF	Spoiny ciągłe – 40 mm
Rysunek spoiny wg WPS	<p style="text-align: center;">317-K03-G22-031</p>			
AT 13-14	317-THV04-G22-031	15.5	PF	Spoiny ciągłe – 40 mm
Rysunek spoiny wg WPS	<p style="text-align: center;">317-THV04-G22-031</p>			
AP 3; 6 / AR 9; 12	317-THS03-G22-031	10.5	PA	Spoiny ciągłe – 90 mm
Rysunek spoiny wg WPS	<p style="text-align: center;">317-THS03-G22-031</p>			
AT 15	317-THV04-G22-031	15.5	PA	Spoina ciągła – 90 mm
Rysunek spoiny wg WPS	<p style="text-align: center;">317-THV04-G22-031</p>			

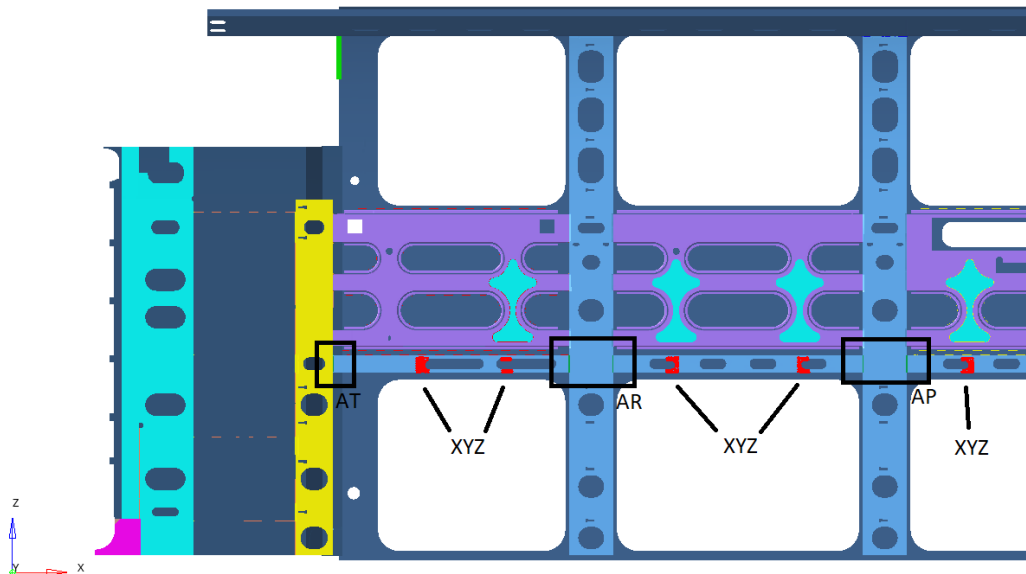
gdzie:

WPS – plan spawania,

PA – pozycja podolna spawania,

PF – pozycja pionowa z dołu do góry spawania.

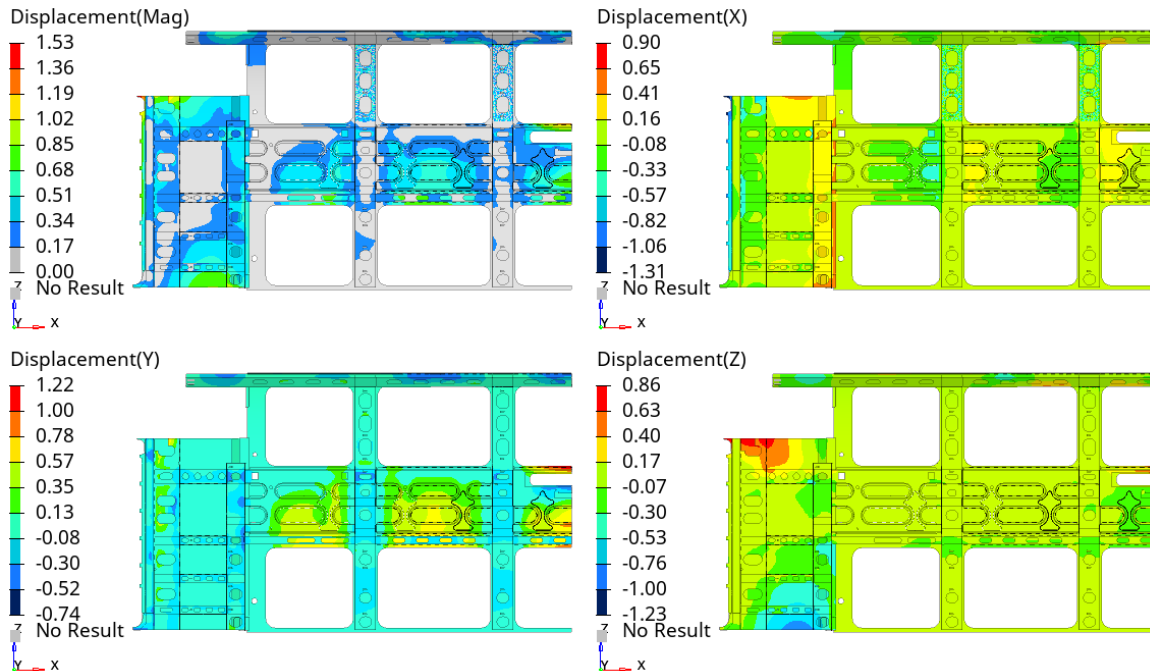
Do warunków brzegowych podparcia zdefiniowanych podczas poprzedniej operacji dodano dodatkowe punkty mocowania wskazane przez algorytm optymalizacji (rys. 93).



Rys. 93. Schemat podparcia komponentu

5.12.1 Sekcja środkowa – operacja nr 4 – wyniki obliczeń

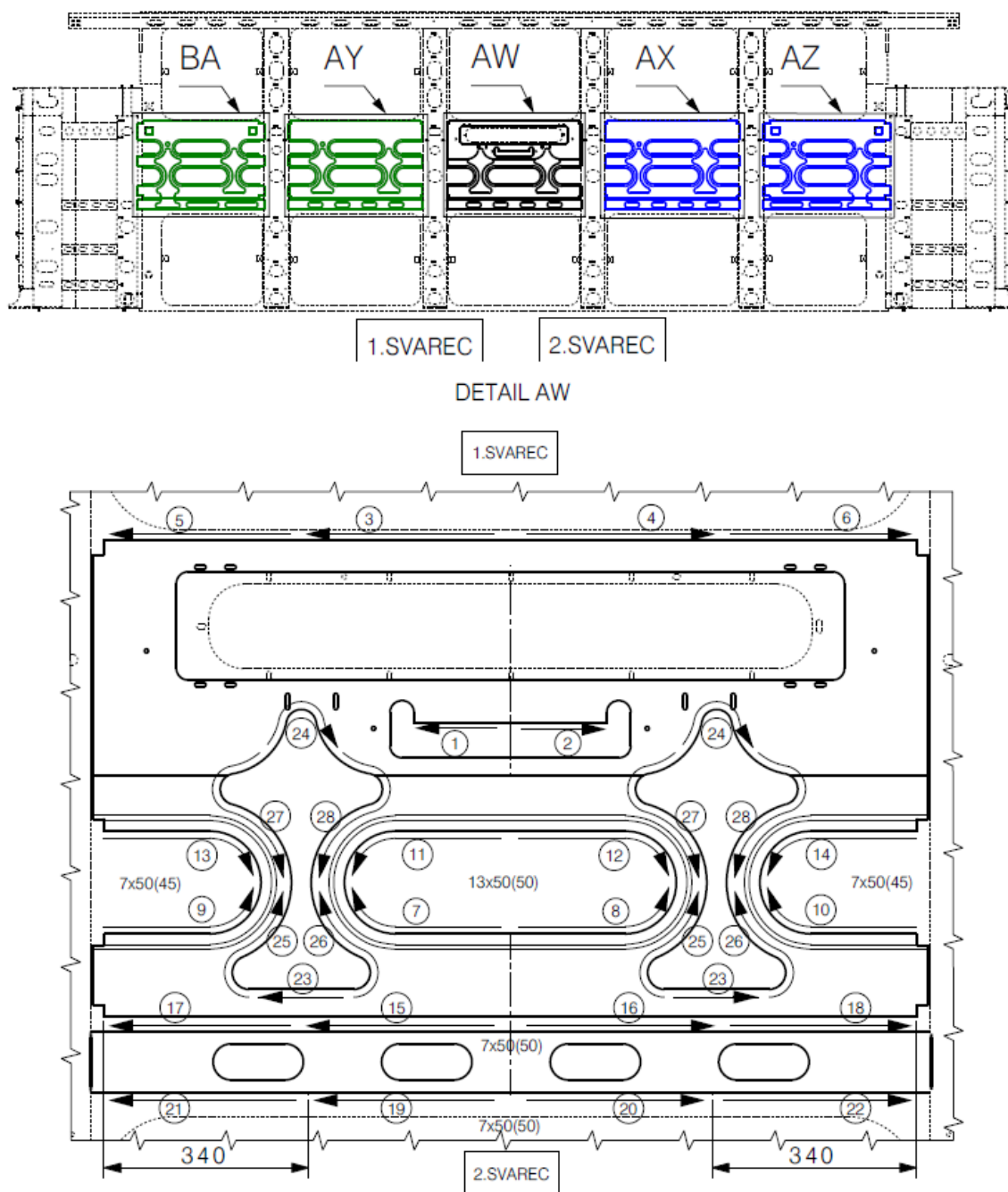
Dodanie profili pod panelami wpłynęło głównie na przemieszczenia w osi X, powtarzając tendencję do skurczu w tym kierunku zauważalnego również w poprzednich operacjach. Wyniki z operacji nr 4 są nałożone na wynikową superpozycję poprzednich operacji (rys. 94).



Rys. 94. Przemieszczenia występujące w konstrukcji po operacji spawania nr 4 sekcji środkowej [mm]

5.13 Sekcja środkowa – operacja nr 5 – warunki brzegowe

W operacji 5 zostaje do poszycia w pełni dospawany panel oznaczony na rys. 95 jako AW znajdujący się w środku, przy warunku brzegowym symetrycznego podparcia. W tej operacji zostają zakończone prace spawalnicze dotyczące tego panelu.



Rys. 95. Schemat kolejności spawania dla operacji nr 5, sekcja środkowa oraz boczna

W tab. 17 znajduje się zestawienie obejmujące: numer spoiny, pozycję spawania oraz ilość wprowadzonego ciepła podczas procesu.

Tab. 17. Dane dotyczące procesu spawania dla operacji nr 5, sekcja środkowa

Sekwencja spawania	WPS	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/cm]	Pozycja	Komentarz
1; 2	317-K02-G21-031	5.5	PB	Spoina ciągła – 160 mm
Rysunek spoiny wg WPS				
3-14	317-PK2.5-G21-031	4.5	PB	3, 4 - Spoina przerywana – 4x50(50)
				5, 6 - Spoina przerywana – 3x50(50)
				7, 8 – Spoina przerywana – 3x50(50)
				9, 10 – Spoina przerywana – 3x50(45)
				11, 12 – Spoina przerywana – 3x50(50)
				13, 14 – Spoina przerywana – 3x50(45)
Rysunek spoiny wg WPS				
15; 16; 19; 20	317-K02-G22-031	5.5	PB	Spoina przerywana – 4x50(50) każda
Rysunek spoiny wg WPS				
17; 18; 21; 22	317-K02-G22-031	5.5	PB	Spoina przerywana – 4x50(50) każda
Rysunek spoiny wg WPS				
23-28	317-PK04-G12-031	5.0	PB	23 – Spoina ciągła – 170 mm

				24 – Spoina ciągła – 160 mm
				25-26 – Spoina ciągła - 320 mm
				27-28 – Spoina ciągła - 210 mm
Rysunek spoiny wg WPS	317-PK04-G12-031			

gdzie:

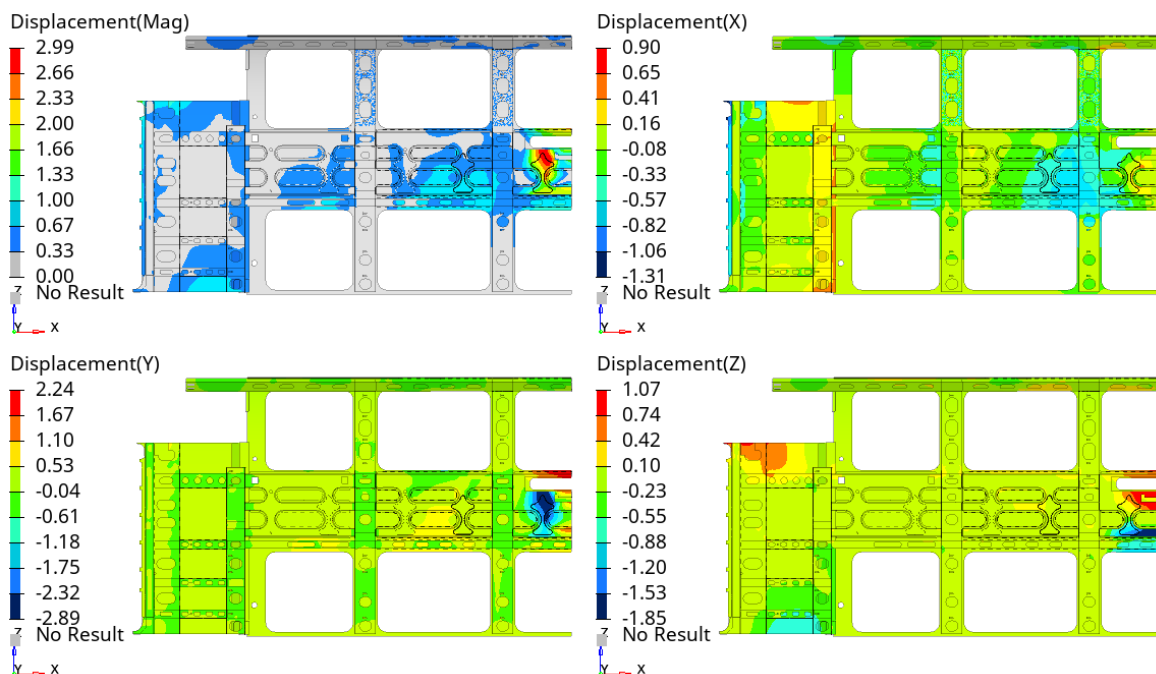
WPS – plan spawania,

PB – pozycja naboczna spawania.

Warunki podparcia modelu pozostają analogiczne do poprzedniego kroku.

5.13.1 Sekcja środkowa – operacja nr 5 – wyniki obliczeń

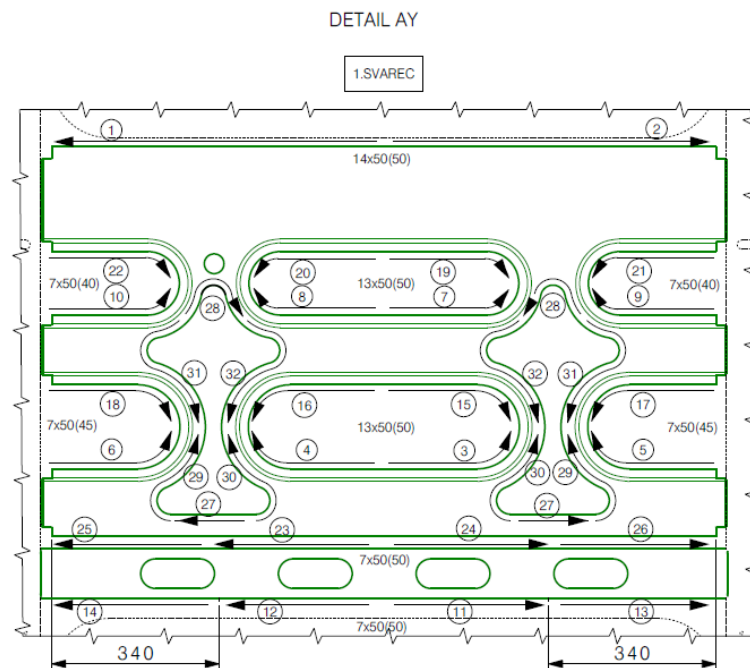
W operacji nr 5 jest zauważalny globalny wpływ spawania panelu do struktury poszycia, zarówno w osi X, Y, jak i Z. Dochodzi do wybrzuszenia panelu w osi Y oraz skurczenia w kierunku pionowym (oś Z) oraz nieznacznie w poziomym (oś X) (rys. 96).



Rys. 96. Przemieszczenia występujące w konstrukcji po operacji spawania nr 5 sekcji środkowej [mm]

5.14 Sekcja środkowa – operacja nr 6 – warunki brzegowe

W operacji nr 6 zostaje do poszycia w pełni dospawany panel oznaczony na rys. 97 jako AY znajdujący się pomiędzy profilami pionowymi. W tej operacji zostają zakończone prace spawalnicze dotyczące tego panelu.



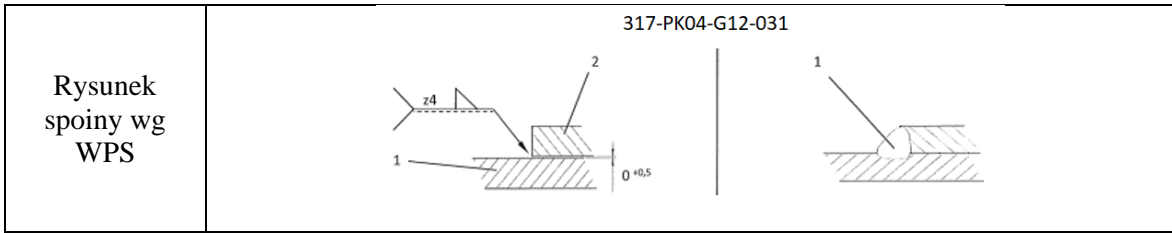
Rys. 97. Schemat kolejności spawania dla operacji nr 6, sekcja środkowa oraz boczna

W tab. 18 znajduje się zestawienie obejmujące: numer spoiny, pozycję spawania oraz ilość wprowadzonego ciepła podczas procesu.

Tab. 18. Dane dotyczące procesu spawania dla operacji nr 6, sekcja środkowa

Sekwencja spawania	WPS	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/cm]	Pozycja	Komentarz
1-10; 15-22	317-PK2.5-G21-031	4.5	PB	1, 2 – Spoina przerywana - 7x50(50)
				3, 4 – Spoina przerywana - 3x50(50)
				5, 6 – Spoina przerywana – 3x50(45)
				7, 8 – Spoina przerywana – 3x50(50)
				9, 10 – Spoina przerywana – 3x50(40)
				15, 16 – Spoina

				przerywana – 4x50(50)
				17, 18 – Spoina przerywana 4x50(45)
				19, 20 – Spoina przerywana – 4x50(50)
				21, 22 – Spoina przerywana – 4x50(40)
Rysunek spoiny wg WPS	317-PK2.5-G21-031			
11; 12; 23; 24	317-K02-G22-031	5.5	PB	Spoina przerywana 7x50(50)
Rysunek spoiny wg WPS	317-K02-G21-031			
13; 14; 25; 26	317-K02-G22-031	5.5	PB	Spoina przerywana 4x50(50)
Rysunek spoiny wg WPS	317-K02-G21-031			
27-32	317-PK04-G12-031	5.0	PB	27 – Spoina ciągła – 170 mm
				28 – Spoina ciągła – 160 mm
				29-30 – Spoina ciągła - 320 mm
				31-32 – Spoina ciągła - 210 mm



gdzie:

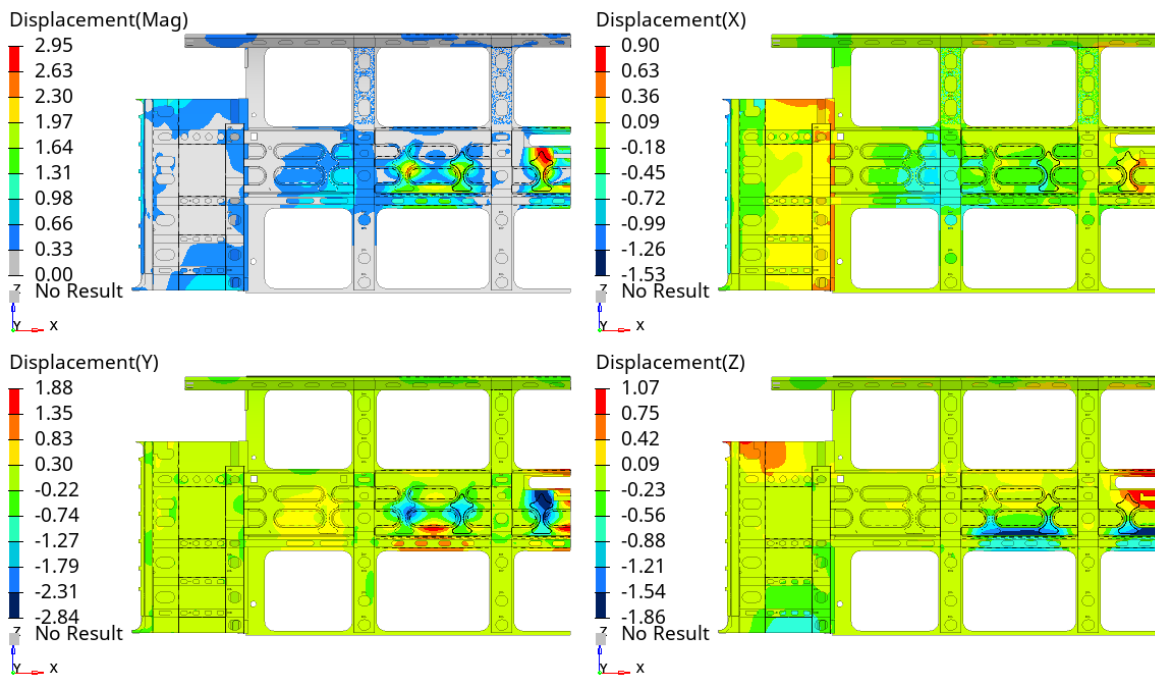
WPS – plan spawania,

PB – pozycja naboczna spawania.

Warunki podparcia modelu pozostają analogiczne do poprzedniego kroku.

5.14.1 Sekcja środkowa – operacja nr 6 – wyniki obliczeń

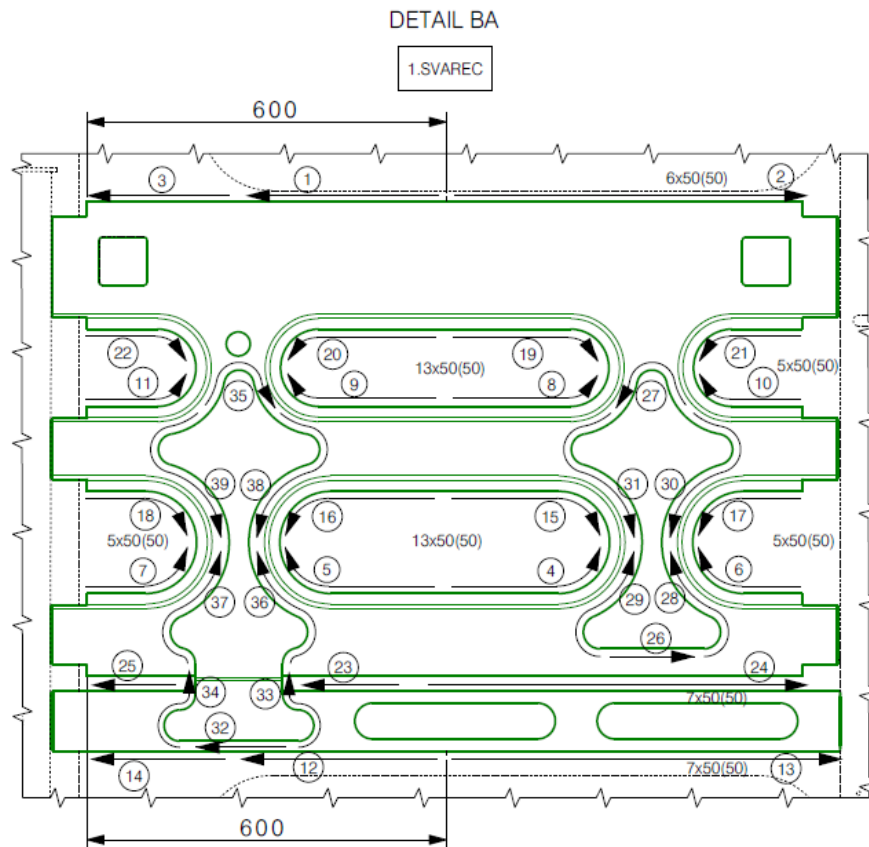
Po przyspawaniu środkowego panelu również pojawiają się wyróżniające się wynikowe przemieszczenia, natomiast nadal dominujące po stronie prawego panelu (rys. 98). W osi X zauważalny jest efekt skurczenia się konstrukcji. W osi Y zaobserwowano wybrzuszenie panelu oraz odkształcenie blachy poszycia poniżej panelu.



Rys. 98. Przemieszczenia występujące w konstrukcji po operacji spawania nr 6 sekcji środkowej [mm]

5.15 Sekcja środkowa – operacja nr 7 – warunki brzegowe

W operacji 7 zostaje do poszycia w pełni dospawany panel oznaczony na rys. 99 jako BA znajdujący się po lewej stronie łącznie z nakładką łączącą panel z profilem znajdującym się pod nim. W tej operacji zostają zakończone prace spawalnicze dotyczące tego panelu.




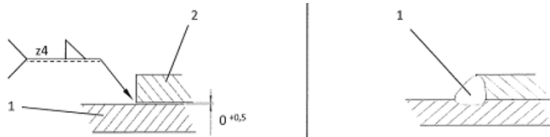
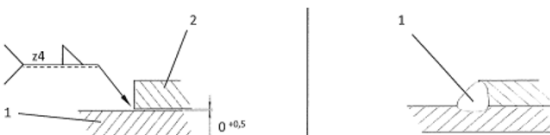
Rys. 99. Schemat kolejności spawania dla operacji nr 7, sekcja środkowa oraz boczna

W tab. 19 znajduje się zestawienie obejmujące: numer spoiny, pozycję spawania oraz ilość wprowadzonego ciepła podczas procesu.

Tab. 19. Dane dotyczące procesu spawania dla operacji nr 7, sekcja środkowa

Sekwencja spawania	WPS	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/cm]	Pozycja	Komentarz
1; 3; 11; 22	317-PK2.5-G21-031	4.5	PB	1 – Spoina przerywana 4x50(50)
				3 – Spoina przerywana 2x50(50)
				11 – Spoina przerywana 3x50(50)
				22 – Spoina przerywana 4x50(50)
Rysunek spoiny wg WPS	317-PK2.5-G21-031			

2; 4-11; 15-22	317-PK2.5-G21-031	4.5	PB	2 – Spoina przerywana – 6x50(50)
				4, 5 – Spoina przerywana - 3x50(50)
				6,7 - Spoina przerywana - 3x50(50)
				8, 9 - Spoina przerywana - 3x50(50)
				10, 11 - Spoina przerywana - 3x50(50)
				15, 16 - Spoina przerywana - 4x50(50)
				17, 18 - Spoina przerywana - 4x50(50)
				19, 20 - Spoina przerywana - 4x50(50)
				21, 22 - Spoina przerywana - 4x50(50)
Rysunek spoiny wg WPS	317-PK2.5-G21-031			
12; 14; 23; 25	317-K02-G22-031	5.5	PB	12, 23 – Spoina przerywana – 4x50(50)
				14, 25 – Spoina przerywana – 2x50(50)
Rysunek spoiny wg WPS	317-K02-G21-031			
13; 24	317-K02-G22-031	5.5	PB	Spoina przerywana – 7x50(50)

Rysunek spoiny wg WPS	<p style="text-align: center;">317-K02-G21-031</p> 			
26-31; 35-39	317-PK04-G12-031	5.0	PB	<p>26 – Spoina ciągła – 170 mm</p> <p>27 – Spoina ciągła – 160 mm</p> <p>28-29 – Spoina ciągła - 210 mm</p> <p>30-31 – Spoina ciągła - 320 mm</p> <p>35 – Spoina ciągła – 160 mm</p> <p>36-37 – Spoina ciągła - 210 mm</p> <p>38-39 – Spoina ciągła - 320 mm</p>
Rysunek spoiny wg WPS	<p style="text-align: center;">317-PK04-G12-031</p> 			
32-34	317-PK04-G12-031	5.0	PB	<p>32 - Spoina ciągła – 170 mm</p> <p>33-34 – Spoina ciągła – 160 mm</p>
Rysunek spoiny wg WPS	<p style="text-align: center;">317-PK04-G12-031</p> 			

gdzie:

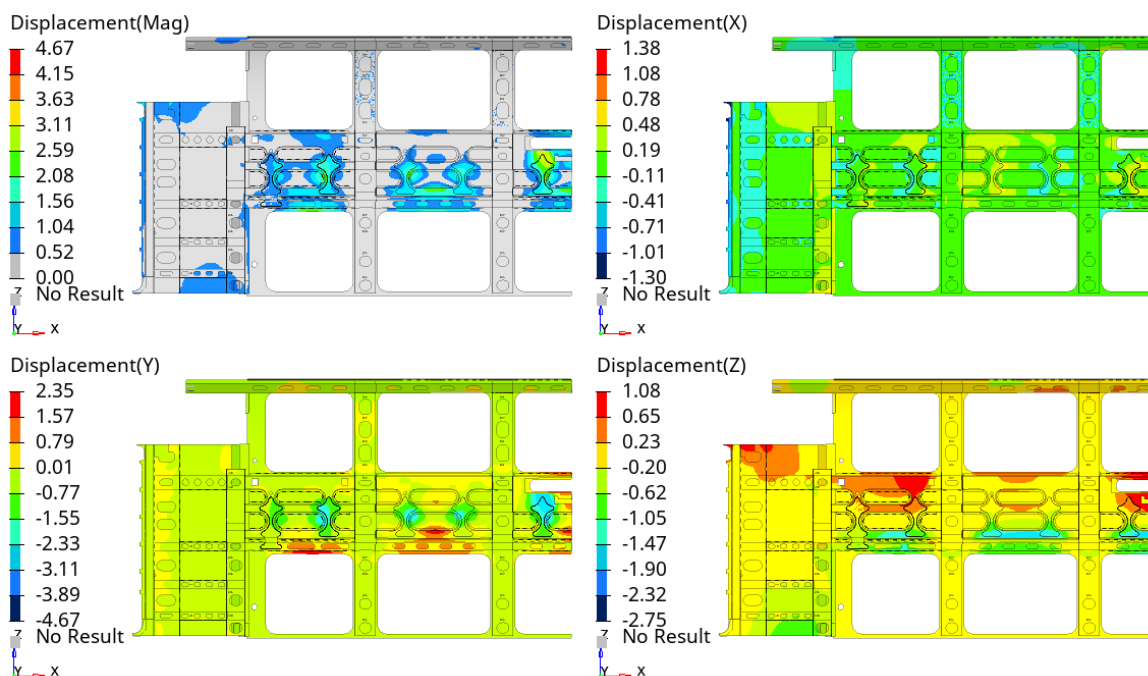
WPS – plan spawania,

PB – pozycja naboczna spawania.

Warunki podparcia modelu pozostają analogiczne do poprzedniego kroku.

5.15.1 Sekcja środkowa – operacja nr 7 – wyniki obliczeń

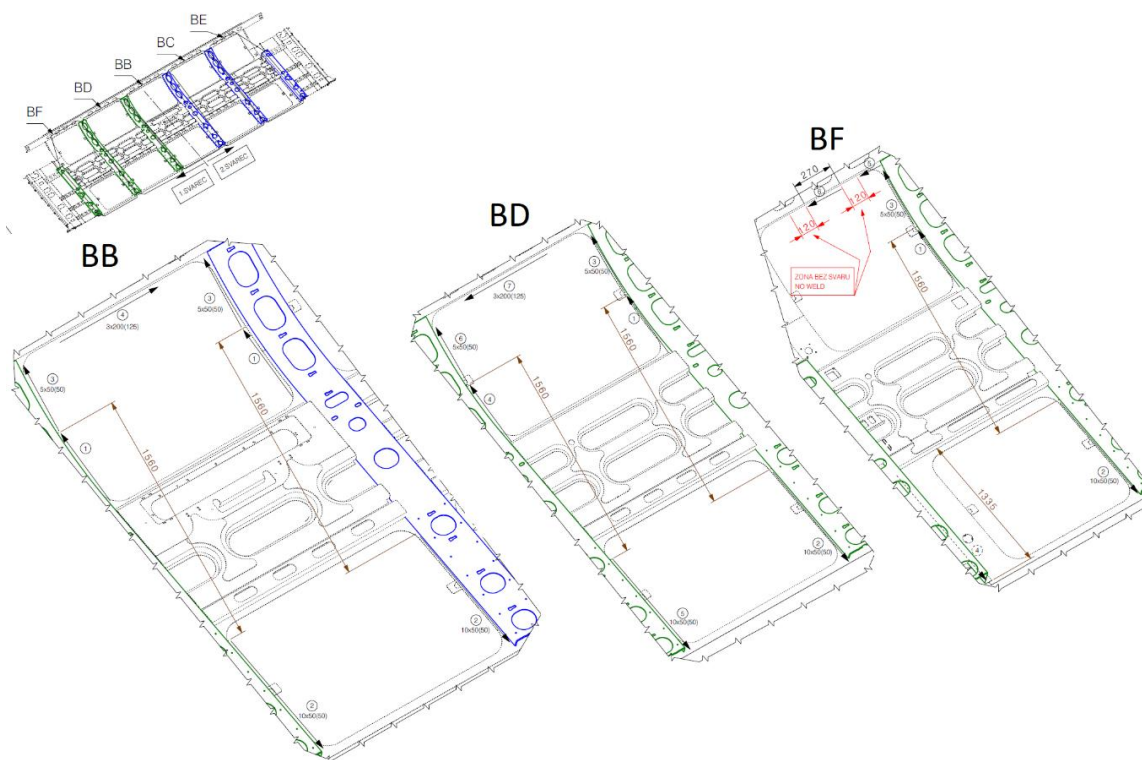
Wynikowe przemieszczenia również są zauważalne w panelu prawym. W osi X ponownie pojawia się efekt skurczu a w osi Y zauważalne są analogiczne deformacje jak w przypadku operacji nr 6. Największe przemieszczenia odnotowano w osi Z, w górnej części panelu, a więc są to przemieszczenia w kierunku pionowym (rys. 100).



Rys. 100. Przemieszczenia występujące w konstrukcji po operacji spawania nr 7 sekcji środkowej [mm]

5.16 Sekcja środkowa – operacja nr 8 – warunki brzegowe

Operacja nr 8 ma na celu finalne dospawanie profili pionowych oraz górnego profilu wzdłużnego na krawędziach zewnętrznych na wysokości otworów okiennych (rys. 101).



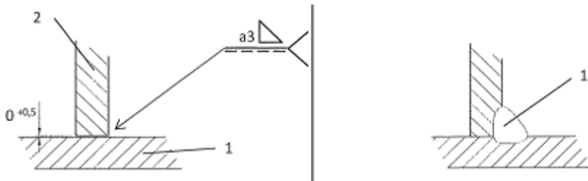
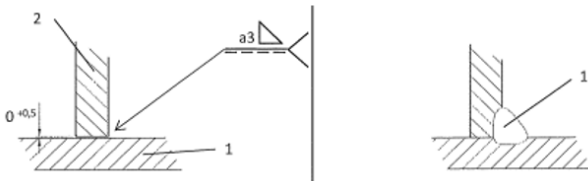
Rys. 101. Schemat kolejności spawania dla operacji nr 8, sekcja środkowa oraz boczna

W tab. 20 znajduje się zestawienie obejmujące: numer spoiny, pozycję spawania oraz ilość wprowadzonego ciepła podczas procesu.

Tab. 20. Dane dotyczące procesu spawania dla operacji nr 8, sekcja środkowa

Sekwencja spawania	WPS	Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/cm]	Pozycja	Komentarz
Widok - BB				
1-3	317-K02-G22-031	5.5	PB	1 – Spoina ciągła – 1560 mm
				2 – Spoina przerywana – 10x50(50)
				3 – Spoina przerywana - 5x50(50)
Rysunek spoiny wg WPS	317-K02-G21-031			
4	317-K02-G22-031	5.5	PB	Spoina przerywana – 3x200(125)

Rysunek spoiny wg WPS				
Widok - BD				
1-6	317-K02-G22-031	5.5	PB	1,4 – Spoina ciągła – 1560 mm 2,5 – Spoina przerywana – 10x50(50) 3,6 – Spoina przerywana - 5x50(50)
Rysunek spoiny wg WPS				
7	317-K02-G22-031	5.5	PB	Spoina przerywana – 3x200(125)
Rysunek spoiny wg WPS				
Widok - BF				
1-3	317-K02-G22-031	5.5	PB	1 – Spoina ciągła – 1560 mm 2 – Spoina przerywana – 10x50(50) 3 – Spoina przerywana - 5x50(50)
Rysunek spoiny wg WPS				
4	317-K03-G22-031	6.0	PB	Spoina ciągła – 1335 mm

Rysunek spoiny wg WPS	<p style="text-align: center;">317-K03-G22-031</p> 		
5-6	317-K03-G22-031	6.0	<p style="text-align: center;">PB</p> <p>5 – Spoina ciągła – 120 mm</p> <p>6 – Spoina ciągła – 270 mm</p>
Rysunek spoiny wg WPS	<p style="text-align: center;">317-K03-G22-031</p> 		

gdzie:

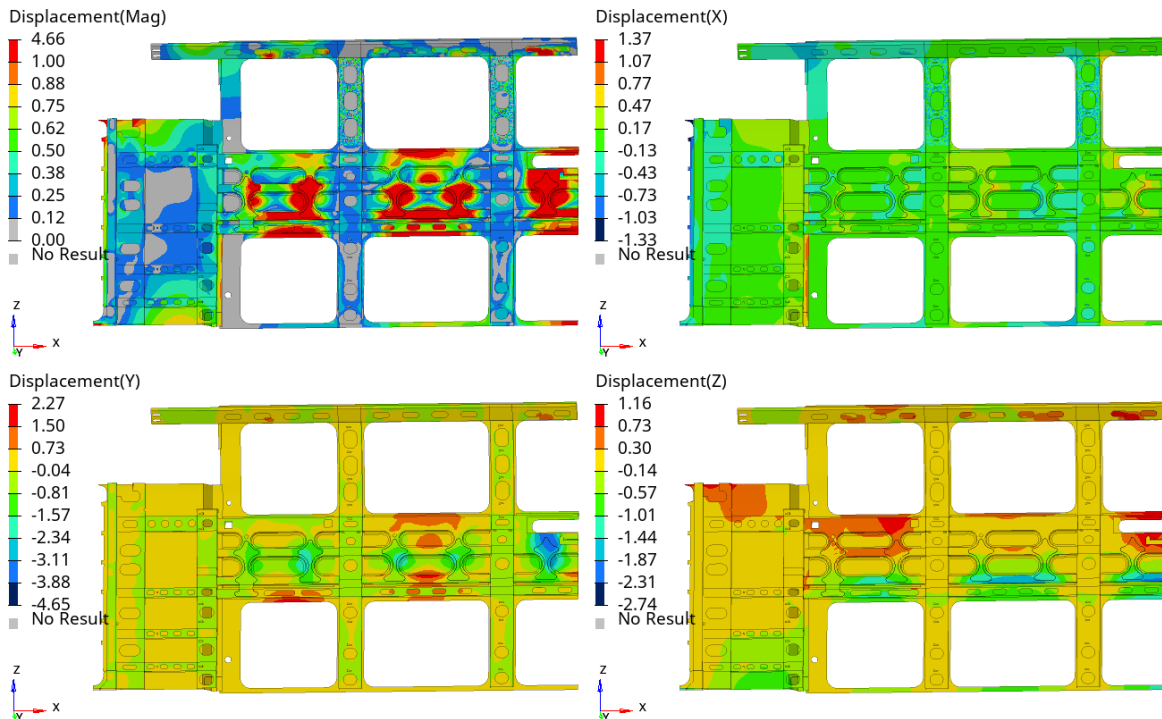
WPS – plan spawania,

PB – pozycja naboczna spawania.

Warunki podparcia modelu pozostają analogiczne do poprzedniego kroku.

5.16.1 Sekcja środkowa – operacja nr 8 – wyniki obliczeń

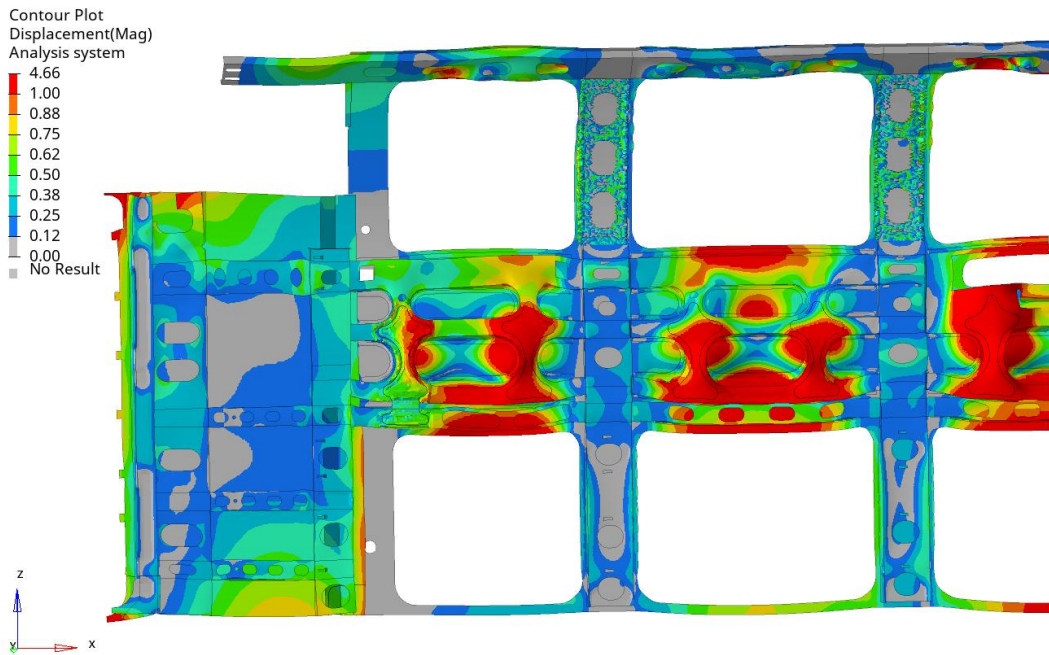
Operacja 8 w największym stopniu wpływa na odkształcenia otworów okiennych oraz profili pionowych (rys. 102), spowodowane jest to wprowadzeniem dużej ilości ciepła i faktem, że obszar otworów okiennych jest szczególnie podatny na deformacje. Poszycie w tym obszarze deformuje się w kierunku wewnętrznym, gdzie znajduje się spoina łącząca słupki pionowe oraz panele z poszyciem.



Rys. 102. Przemieszczenia występujące w konstrukcji po operacji spawania nr 8 sekcji środkowej [mm]

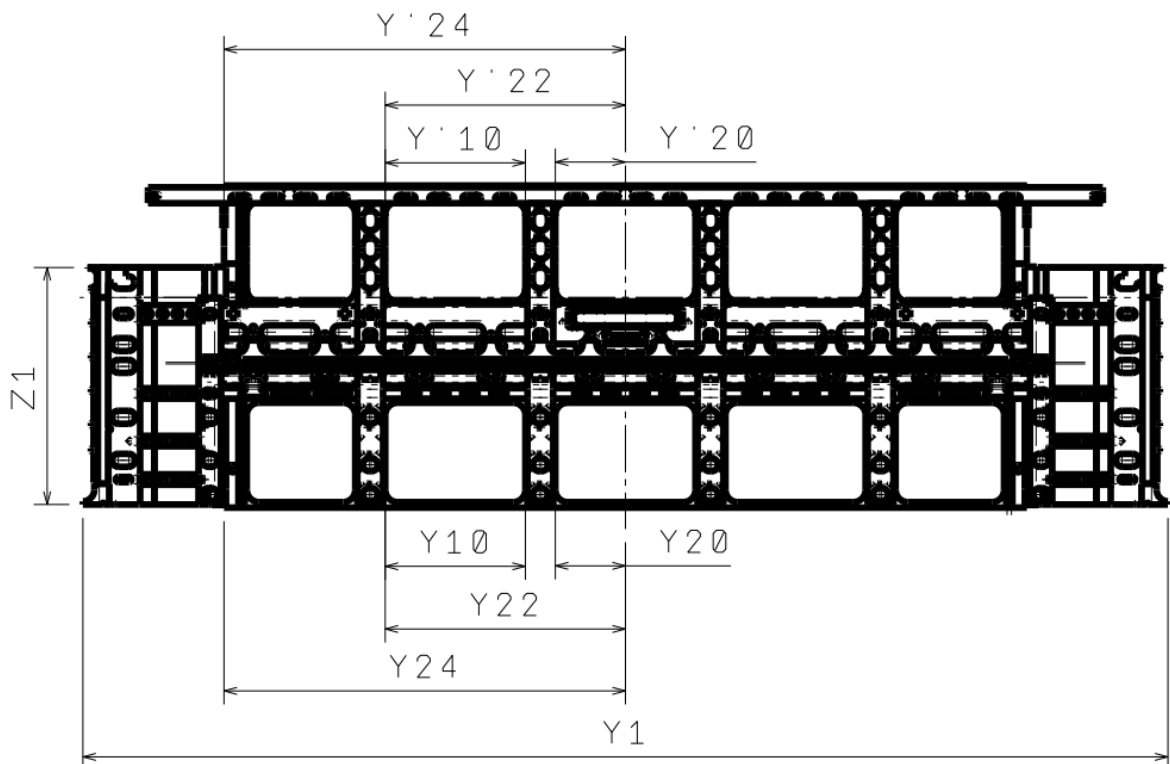
5.17 Korelacja z pomiarami

Głównym celem przedstawionej w niniejszym rozdziale realizacji była walidacja opracowanego systemu poprzez porównanie wyników uzyskanych drogą symulacji numerycznych, przeprowadzonych z uwzględnieniem zaproponowanej metodyki z pomiarami rzeczywistymi wykonanymi na hali produkcyjnej po dostosowaniu oprzyrządowania. Na rys. 103 przedstawiono globalny model z naniesionymi przemieszczeniami uzyskanymi dla ściany bocznej po pełnym procesie symulacji spawania, uwzględniono również zwolnienie więzów nadawanych przez przyrząd (skala deformacji 50:1). Legendę wyskalowano tak aby każde przemieszczenie powyżej wartości 1 mm było wyświetlane na kolor czerwony.



Rys. 103. Model poszycia z mapą przemieszczeń [mm]

Na rys. 104 przedstawiono widok poszycia. Najbardziej istotne pomiary dla tego przypadku dotyczą wymiarów: Y_{10} , Y_{10}' , Y_{20} , Y_{20}' , Y_{22} , Y_{22}' , Y_{24} oraz Y_{24}' . Dla tych wymiarów odnotowane były znaczące problemy podczas procesu produkcyjnego, które skutkowały utrudnieniem montażu okien. Dodatkowo porównano wymiary Y_1 oraz Z_1 , które są kluczowe z punktu widzenia możliwości połączenia poszycia z pozostałymi komponentami (podwozie, dach, ściany końcowe).



Rys. 104. Arkusz pomiarowy poszycia

Pomiarów dokonano przy użyciu dalmierza laserowego Leica Absolute Tracker AT500 potocznie zwanego z języka angielskiego *Laser Trackerem*, w temperaturze otoczenia $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ (rys. 105). Dalmierze laserowe są szeroko stosowane do wykonywania pomiarów w przemyśle z powodu ich wysokiej dokładności (sięgającej dziesięciotysięcznych milimetra) oraz możliwości szybkiego pomiaru dla znacznych odległości między punktami pomiarowymi. Urządzenia tego typu wykorzystują wiązkę laserową do precyzyjnego pomiaru odległości oraz kątów w trzech wymiarach. Zastosowane urządzenie daje możliwość określenia wymiarów w przestrzeni trójwymiarowej i należy do najbardziej dokładnych urządzeń pomiarowych dostępnych obecnie na rynku. Dodatkowymi zaletami tego typu urządzenia jest wysoka precyzja, mobilność oraz możliwość pomiaru bez kontaktu.



Rys. 105 Głowica dalmierza laserowego Leica Absolute Tracker AT500 [52]

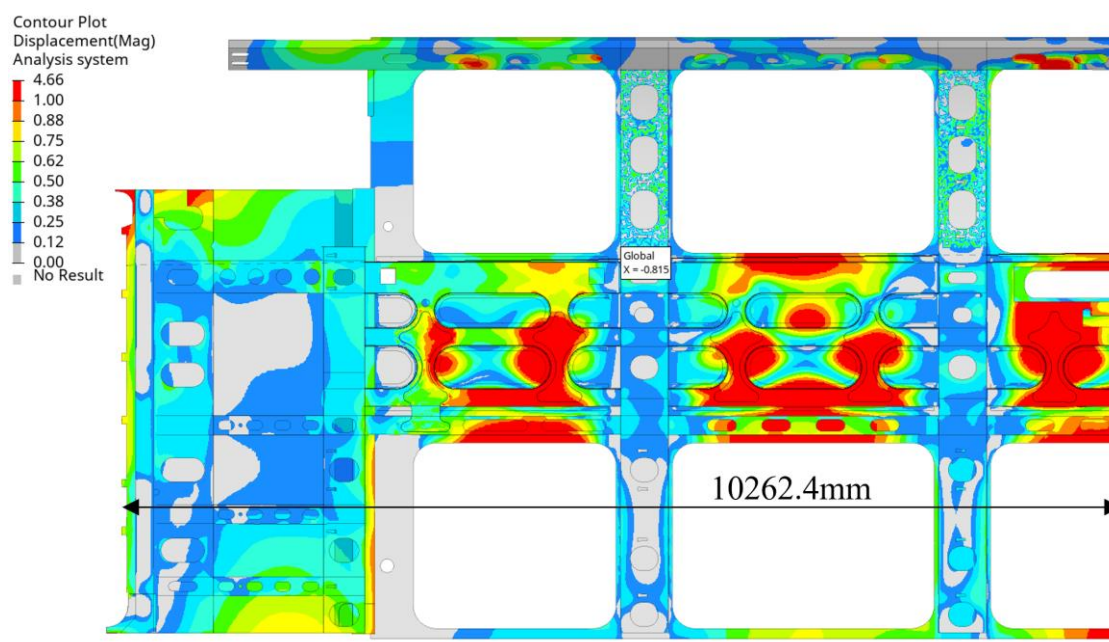
Głównymi elementami używanymi przy pomiarach urządzeniami laserowymi są:

- źródło lasera – wiązka generowana jest przez głowicę urządzenia, wiązka musi być stabilna, aby pomiar był dokładny,
- interferometr – mierzy czas potrzebny wiązce lasera na przebycie drogi do mierzonego punktu i z powrotem,
- pryzmat narożny – umieszczany jest w mierzonym punkcie, wbudowany w nim reflektometr odbija wiązkę w kierunku głowicy urządzenia pomiarowego,
- jednostka sterująca – analizuje dane pomiarowe, przetwarza sygnały i zarządza śledzeniem pryzmatu narożnego,
- baza – dedykowany stojak, który musi być stabilny przez cały czas trwania pomiarów.

Analogiczne pomiary zostały wykonane dla wyników uzyskanych poprzez zastosowanie zaproponowanej metody numerycznej. W dalszej części pracy przedstawiono ich porównanie wraz z oszacowaniem różnicy w wynikach. Dokładność pomiarową w przypadku konstrukcji poszycia ustanowiono do dziesiątej części milimetra.

5.17.1 Porównanie wymiaru Y1

Na rys. 106 przedstawiono pomiar uzyskany dla wymiaru Y1. Z powodu zastosowania modelu połówkowego oraz symetrycznego warunku brzegowego wymiar dla całkowitej długości uzyskany z analizy należy pomnożyć przez dwa. Odnotowano tendencję do zmniejszenia wymiaru o ponad 1.6 mm, spowodowane jest to skurczem spawalniczym pochodzącym głównie od procesu spawania paneli umieszczonych między otworami okiennymi. Różnica między wynikami analizy MES a pomiarami rzeczywistymi wynosi 2.1 mm.



Rys. 106. Wynik pomiaru uzyskany dla wymiaru Y1 [mm]

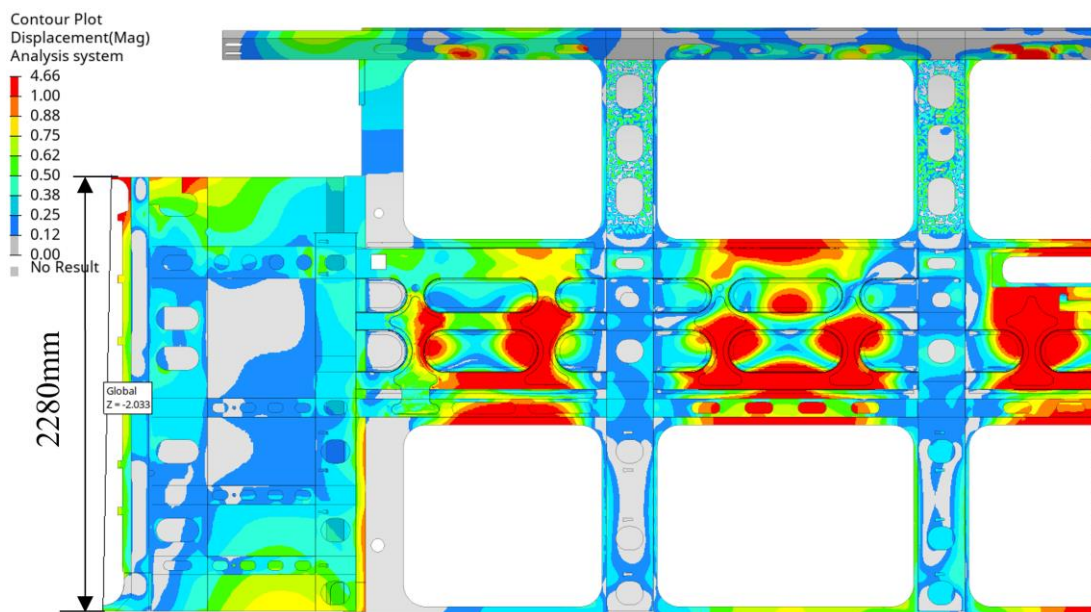
W tab. 21 zestawiono zmierzone wartości wraz z otrzymaną różnicą pomiędzy wynikami symulacji i pomiarem rzeczywistym dla wymiaru Y1.

Tab. 21. Zestawienie wyników pomiarów uzyskanych dla wymiaru Y1

Nazwa	Wymiar nominalny	Wymiar zmierzony	Wymiar MES	Różnica [mm]
Y1	10264	10260.3	10262.4	2.1

5.17.2 Porównanie wymiaru Z1

Na rys. 107 przedstawiono pomiar uzyskany dla wymiaru Z1. Wymiar zmniejszył się o 2 mm, spowodowane jest to skurczem spawalniczym z operacji spawania sekcji bocznej. Różnica między wynikami analizy MES a pomiarami rzeczywistymi wynosi 1 mm.



Rys. 107. Wynik pomiaru uzyskany dla wymiaru Z1 [mm]

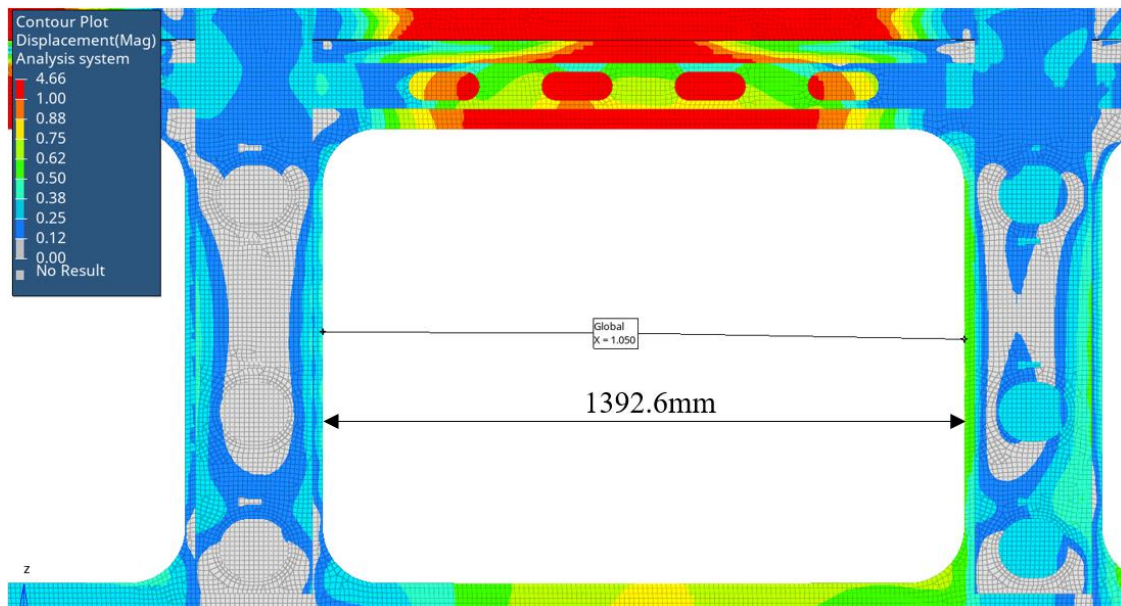
W tab. 22 zestawiono zmierzone wartości wraz z otrzymaną różnicą pomiędzy wynikami symulacji i pomiarem rzeczywistym dla wymiaru Z1.

Tab. 22. Zestawienie wyników pomiarów uzyskanych dla wymiaru Z1

Nazwa	Wymiar nominalny	Wymiar zmierzony	Wymiar MES	Różnica [mm]
Y1	2282	2281	2280	1

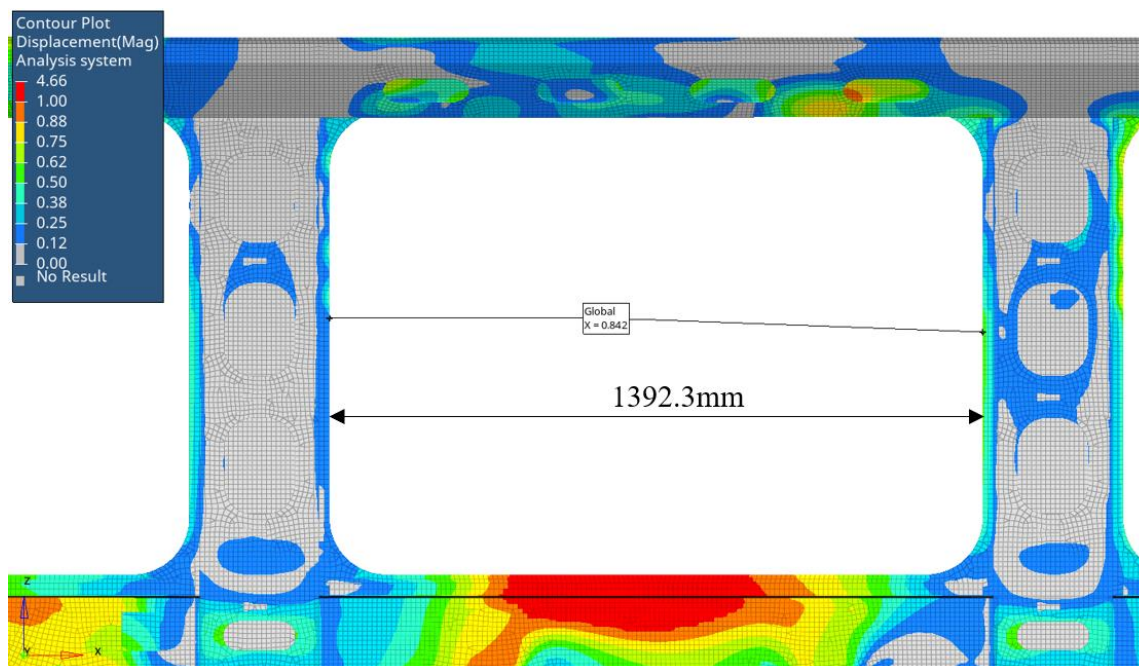
5.17.3 Porównanie wymiarów Y10 oraz Y'10

Na rys. 108 przedstawiono pomiar uzyskany dla wymiaru Y10. Odnotowano tendencję do zwiększania wymiaru, podobnie jak w przypadku pomiaru rzeczywistego. Spowodowane jest to skurczem spawalniczym pochodzącym od spawanego słupka pionowego do poszycia. Poszycie w obszarze wycięcia otworu okiennego ulega deformacji, pofalowaniu. Odkształcenie kątowe skierowane jest do wewnętrznej strony konstrukcji ściany bocznej, gdzie znajduje się spoina, takie zachowanie konstrukcji skutkuje powiększeniem się otworu okiennego. Różnica między wynikami analizy MES a pomiarami rzeczywistymi wynosi 0.4 mm. Zmiana długości względem wartości nominalnej wyniosła 1.1 mm.



Rys. 108. Wynik pomiaru uzyskany dla wymiaru Y10 [mm]

Na rys. 109 przedstawiono pomiar uzyskany dla wymiaru Y'10. Odnotowano tendencję do zwiększania wymiaru, podobnie jak w przypadku pomiaru rzeczywistego. W tym przypadku zaszły analogiczne przemieszczenia jak dla wymiaru Y10. Różnica między wynikami MES a pomiarami rzeczywistymi wynosi 1.7 mm. Zmiana długości względem wartości nominalnej wyniosła 0.8 mm.



Rys. 109. Wynik pomiaru uzyskany dla wymiaru Y'10 [mm]

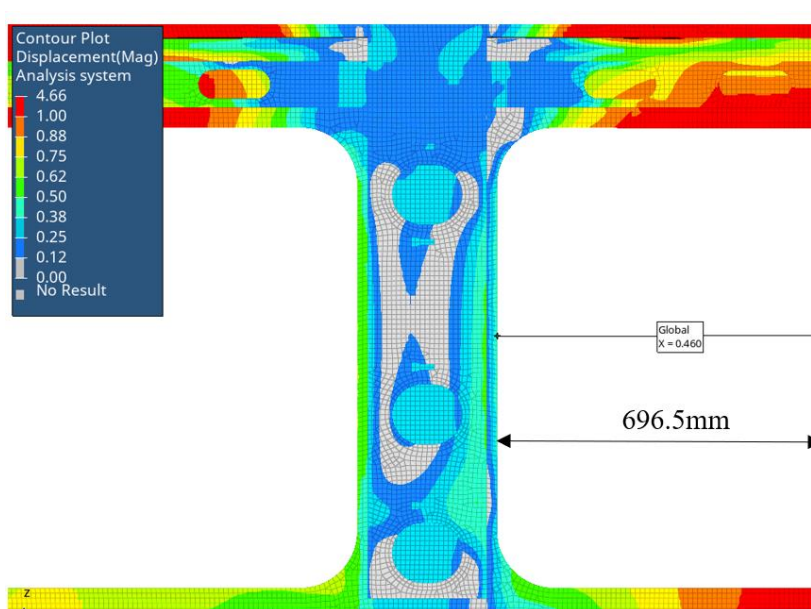
W tab. 23 zestawiono zmierzone wartości wraz z otrzymaną różnicą pomiędzy wynikami symulacji i pomiarami rzeczywistymi dla wymiarów Y10 oraz Y'10.

Tab. 23. Zestawienie wyników pomiarów uzyskanych dla wymiarów Y10 oraz Y'10

Nazwa	Wymiar nominalny	Wymiar zmierzony	Wymiar MES	Różnica [mm]
Y10	1391.5	1393.0	1392.6	0.4
Y'10	1391.5	1394.0	1392.3	1.7

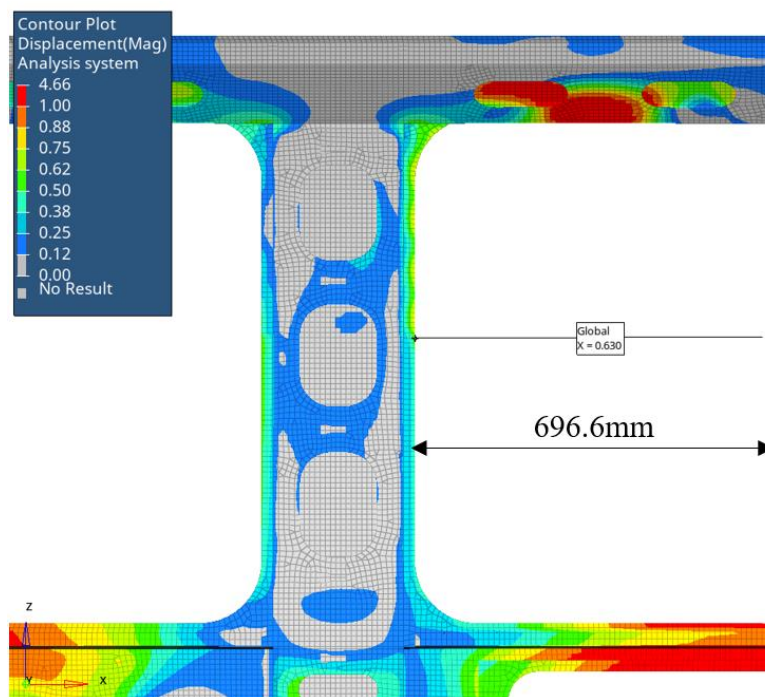
5.17.4 Porównanie wymiarów Y20 oraz Y'20

Na rys. 110 przedstawiono pomiar uzyskany dla wymiaru Y'20. Z uwagi na fakt symetrycznego warunku brzegowego, pomiaru dokonano względem skrajnych punktów, zarówno w górnej części jak i dolnej otworu okiennego. Różnica między wynikami analizy MES a pomiarami rzeczywistymi wynosi 0.5 mm. Zmiana długości względem wartości nominalnej wyniosła 0.5 mm. Podobnie jak dla przypadków otworów okiennych i wymiaru Y10 oraz Y'10 obszar poszycia przy otworze okiennym ulega deformacji do wewnętrznej strony konstrukcji ściany bocznej.



Rys. 110. Wynik pomiaru uzyskany dla wymiaru Y20 [mm]

Analogicznie prezentuje się sytuacja dla odkształcenia górnego otworu okiennego. Różnica między wynikami analizy MES a pomiarami rzeczywistymi wynosi 0.4 mm. Zmiana długości względem wartości nominalnej wyniosła 0.6 mm. Kierunek oraz kształt deformacji pokrył się z rzeczywistą ich postacią (rys. 111).



Rys. 111. Wynik pomiaru uzyskany dla wymiaru Y'20 [mm]

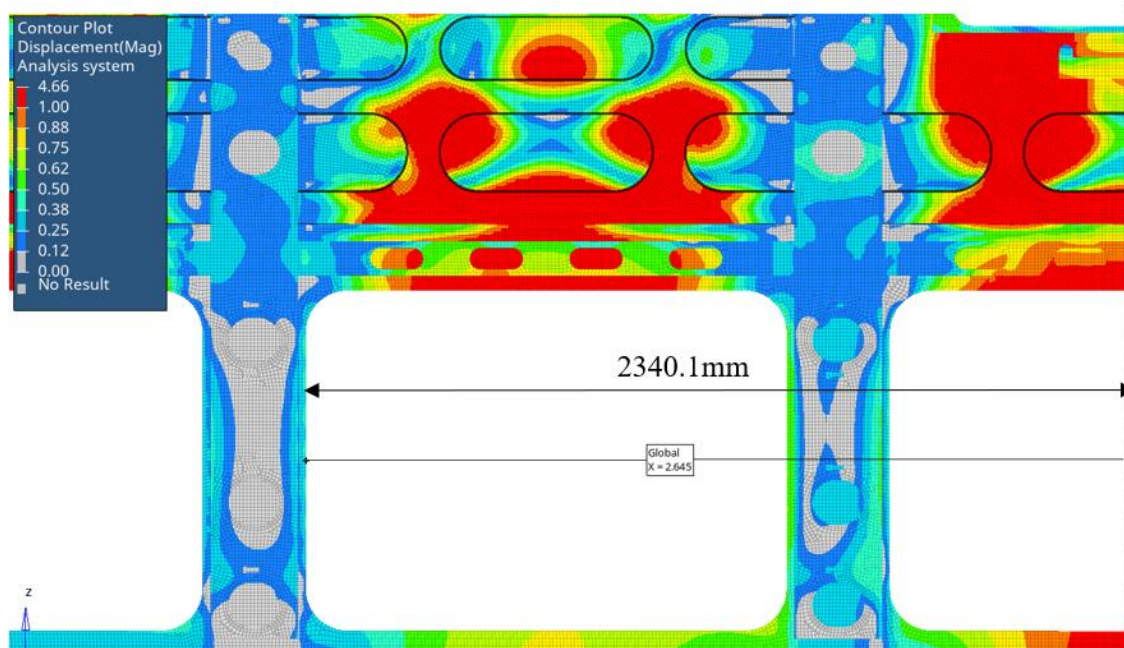
W tab. 24 zestawiono zmierzone wartości wraz z otrzymaną różnicą pomiędzy wynikami symulacji i pomiarami rzeczywistymi dla wymiarów Y20 oraz Y'22.

Tab. 24. Zestawienie wyników pomiarów uzyskanych dla wymiarów Y20 oraz Y'20

Nazwa	Wymiar nominalny	Wymiar zmierzony	Wymiar MES	Różnica [mm]
Y20	696.0	697.0	696.5	0.5
Y'20	696.0	697.0	696.6	0.4

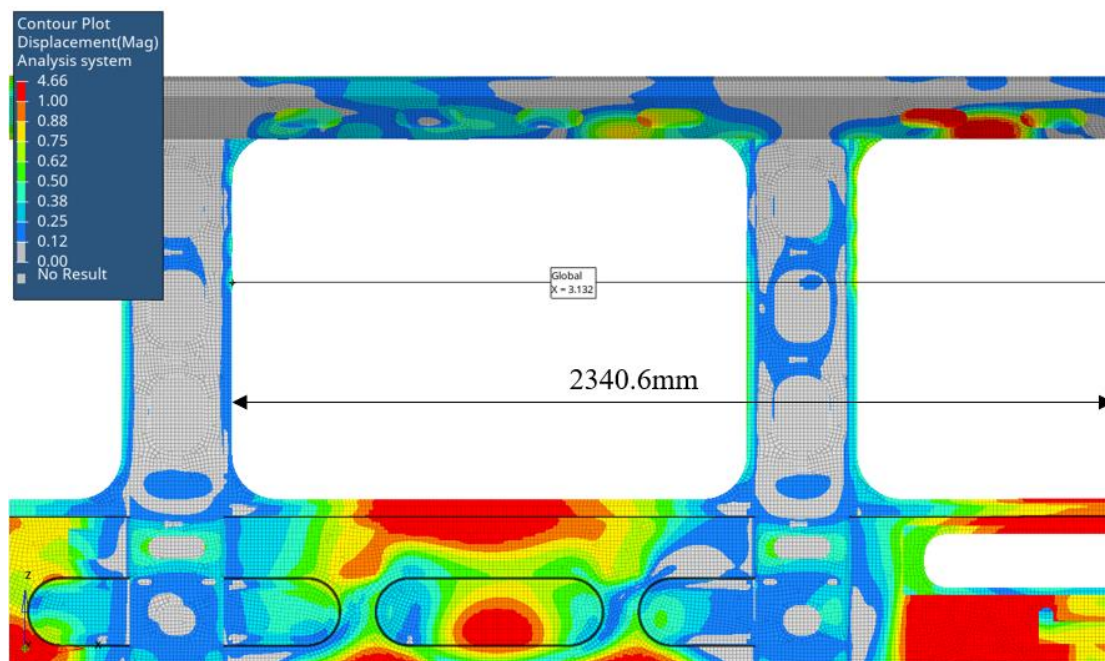
5.17.5 Porównanie wymiarów Y22 oraz Y'22

Na rys. 112 przedstawiono pomiar uzyskany dla wymiaru Y22, odnotowano tendencję do zwiększania wymiaru, podobnie jak w przypadku pomiaru rzeczywistego. Różnica między wynikami analizy MES a pomiarami rzeczywistymi wynosi 1.9 mm. Zmiana długości względem wartości nominalnej wyniosła 2.6 mm. W tym przypadku jest zauważalny wzrost wartości zmiany długości względem przypadków pokazanych powyżej, dotyczy to szczególnie obszaru otworów okiennych. Deformacja jest połączeniem efektu skurczu w obszarze pionowych słupków oraz poszycia, które w tym obszarze jest „ściągane” do środka oraz deformacji ściany bocznej wywołanej skurczem po procesie spawania paneli pomiędzy górnymi a dolnymi otworami okiennymi.



Rys. 112. Wynik pomiaru uzyskany dla wymiaru Y22 [mm]

Analogicznie prezentuje się sytuacja dla odkształcenia na wysokości górnej linii okien. Na rys. 113 przedstawiono pomiar uzyskany dla wymiaru Y'22. Różnica między wynikami analizy MES a pomiarami rzeczywistymi wynosi 0.4 mm. Zmiana długości względem wartości nominalnej wyniosła 3.1 mm.



Rys. 113. Wynik pomiaru uzyskany dla wymiaru Y'22 [mm]

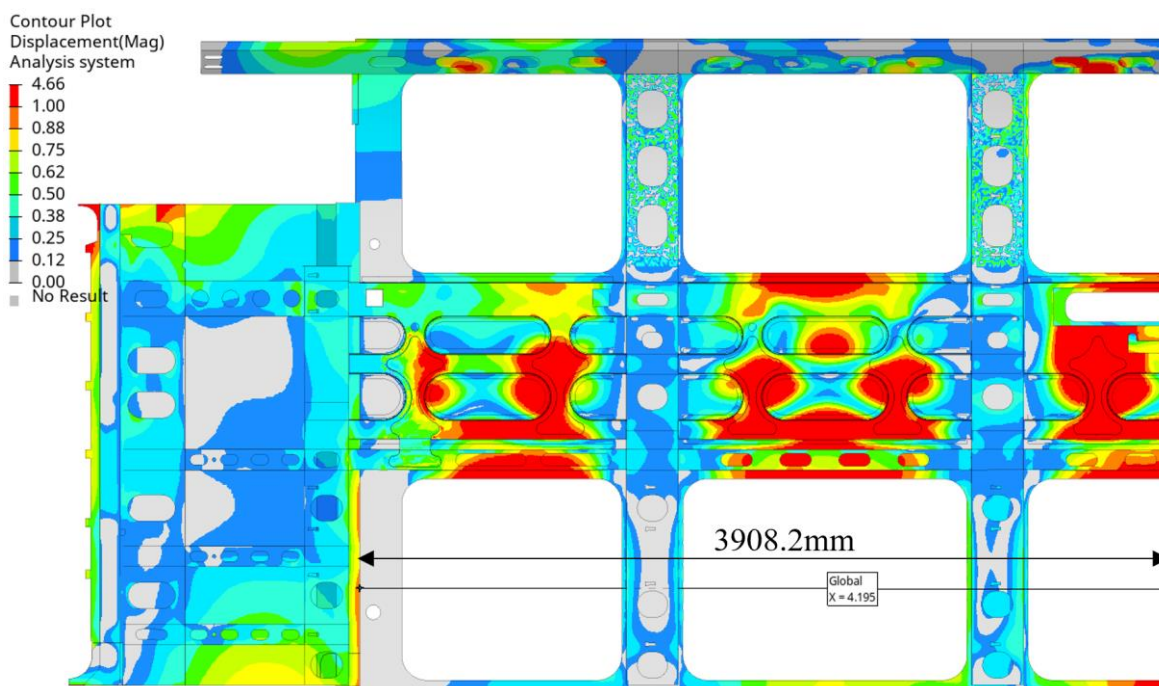
W tab. 25 zestawiono zmierzone wartości wraz z otrzymaną różnicą pomiędzy wynikami symulacji i pomiarami rzeczywistymi dla wymiarów Y22 oraz Y'22.

Tab. 25. Zestawienie wyników pomiarów uzyskanych dla wymiarów Y22 oraz Y'22

Nazwa	Wymiar nominalny	Wymiar zmierzony	Wymiar MES	Różnica [mm]
Y22	2337.5	2342.0	2340.1	1.9
Y'22	2337.5	2341.0	2340.6	0.4

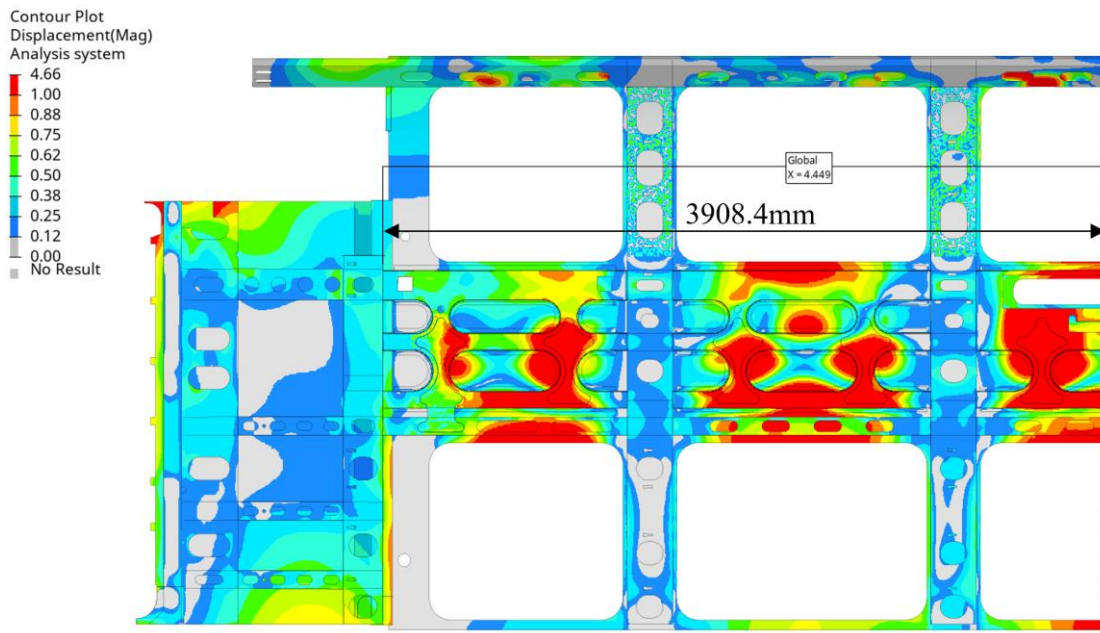
5.17.6 Porównanie wymiarów Y24 oraz Y'24

Na rys. 114 przedstawiono pomiar uzyskany dla wymiaru Y24, odnotowano tendencję do zwiększania wymiaru, podobnie jak w przypadku pomiaru rzeczywistego. Różnica między wynikami analizy MES a pomiarami rzeczywistymi wynosi 1.2 mm. Zmiana długości względem wartości nominalnej wyniosła 4.2 mm. W tym przypadku jest zauważalny wzrost wartości zmiany długości względem przypadków pokazanych powyżej. Deformacja jest połączeniem efektu skurczu w obszarze pionowych słupków oraz poszycia, które w tym obszarze jest „ściągane” do środka oraz deformacji ściany bocznej wywołanej skurczem po procesie spawania paneli pomiędzy górnymi a dolnymi otworami okiennymi.



Rys. 114. Wynik pomiaru uzyskany dla wymiaru Y24 [mm]

Analogicznie prezentuje się sytuacja dla odkształcenia na wysokości górnej linii okien. Na rys. 115 przedstawiono pomiar uzyskany dla wymiaru Y'22. Różnica między wynikami analizy MES a pomiarami rzeczywistymi wynosi 0.6 mm. Zmiana długości względem wartości nominalnej wyniosła 4.4 mm.



Rys. 115. Wynik pomiaru uzyskany dla wymiaru Y'24 [mm]

W tab. 26 zestawiono zmierzone wartości wraz z otrzymaną różnicą pomiędzy wynikami symulacji i pomiarami rzeczywistymi dla wymiarów Y24 oraz Y'24.

Tab. 26. Zestawienie wyników pomiarów uzyskanych dla wymiarów Y24 oraz Y'24

Nazwa	Wymiar nominalny	Wymiar zmierzony	Wymiar MES	Różnica [mm]
Y24	3904	3907	3908.2	1.2
Y'24	3904	3909	3908.4	0.6

5.17.7 Podsumowanie

Przedstawione porównanie pomiędzy pomiarami rzeczywistymi ściany bocznej oraz wynikami symulacji uzyskanymi z zastosowaniem opracowanego systemu potwierdzą poprawność działania opracowanej metodyki. Nieznaczne różnice w wynikach mogą być spowodowane brakiem możliwości idealnego odwzorowania warunków panujących podczas procesu produkcyjnego, takich jak prędkość spawania, czas między poszczególnymi operacjami itp. Wartości przyjęte do symulacji są średnimi wartościami, które występują podczas takiego procesu, jednak mogą one różnić się w zależności od operatora oraz innych czynników zewnętrznych. Pomimo różnic należy zwrócić szczególną uwagę na to, że oraz zaproponowana metodyka oraz opracowany na jej podstawie system wykazał poprawny trend w stosunku do rzeczywistej odpowiedzi układu oraz bardzo porównywalne wyniki. Postać oraz kierunek deformacji w każdym miejscu konstrukcji odpowiada tym odnotowanym dla rzeczywistej konstrukcji poszycia po zakończeniu operacji spawania. Dodatkowo należy zwrócić szczególną uwagę na proces optymalizacji, szeroko omówiony w rozdziale 4 w którym również potwierdzono jego poprawne działanie.

6 Zakończenie

Optymalizacja rozmieszczenia podpór podczas procesu spawania w celu minimalizacji odkształceń trwałych jest istotnym wyzwaniem z punktu widzenia inżynierii oraz przemysłu. Deformacje po procesie spawania są powszechnym problemem, który często prowadzi do kosztownych napraw, obniżenia jakości produktu czy obniżenia wydajności produkcyjnej przedsiębiorstwa. Deformacje pojawiające się po procesie spawania są problemem w przypadku wielu branż, w których produkowane komponenty wymagają zastosowania technologii spawania a koszty związane z naprawami są często bardzo wysokie. Opracowany system wspomagający dobór rozmieszczenia punktów mocowania w obszarze komponentu spawanego opiera się na połączeniu metody elementów skończonych oraz autorskich algorytmów wspomagających proces modelowania. Zaproponowany system znajduje optymalny rozkład podpór na bazie dostępnego dyskretnego zbioru rozwiązań, który zależy od wielu ograniczeń technologicznych i konstrukcyjnych wykluczających możliwość optymalizacji w zakresie ciągłym. Gabaryty oraz złożoność konstrukcyjna komponentów spawanych występujących w strukturach pojazdów szynowych, różnorodność możliwych sposobów podparcia czy uwzględnienie kontrolowanego przegięcia wstępnego komponentu a także wymóg firmy dotyczący stosowalności zaproponowanego systemu w różnych lokalizacjach na świecie i możliwość jego wykorzystania przez inżynierów bez konieczności adaptacji programu komputerowego dla każdego nowego zadania, nie pozwolił na zastosowanie sieci neuronowych lecz jedynie rozwiązania inspirowanego ich działaniem. W efekcie uzyskano skuteczny i efektywny system wspomagający podejmowanie decyzji przez inżyniera procesu lub konstruktora, którzy otrzymują wynik w postaci optymalnego doboru i rozkładu podpór w układzie o skomplikowanej geometrii pozwalający na minimalizację odkształceń trwałych. Biorąc pod uwagę dużą automatyzację pracy po wprowadzeniu przez użytkownika możliwego z punktu widzenia technologicznego i konstrukcyjnego, szerokiego zestawu podpór, oraz znalezienie optymalnego schematu podparcia komponentu, system staje się kompleksowym narzędziem wykazującym działanie w kierunku osiągnięcia określonego celu w czym przejawia się działanie inteligentne.

Dzięki zastosowaniu systemu możliwa była modyfikacja oprzyrządowania oraz redukcja powstałych deformacji. Warto zaznaczyć, iż możliwości redukcji przemieszczeń był ograniczone z powodu braku możliwości modyfikacji pewnych obszarów przyrządu. Dla nowych rozwiązań, w przypadku których oprzyrządowanie będzie projektowane od podstaw, opracowana metoda daje znacznie szersze możliwości prowadzące do ograniczenia deformacji.

Biorąc pod uwagę wyżej opisane aspekty, opracowany system należy uznać za efektywny i skuteczny oraz przygotowany do finalnego wdrożenia w innych lokalizacjach przedsiębiorstwa (dotychczas został wdrożony w lokalizacji właściwej dla autora pracy). Przedstawiony przykład dowodzi ponadto, że opracowany system sprawdził się w przypadku bardzo złożonej konstrukcji spawanej – jednej z bardziej skomplikowanych biorąc pod uwagę przemysł związany z produkcją środków transportu. Przeprowadzony test był pierwszym komercyjnym zastosowaniem opracowanego narzędzia. Opracowany system optymalizacji będzie w dalszym ciągu rozwijany o nowe funkcjonalności. Obecnie prowadzone są prace mające na celu uwzględnienie możliwości optymalizacji

oprzyrządowania pod względem wytrzymałościowym na podstawie wartości sił reakcji otrzymanych w punktach mocowań zdefiniowanych w modelu numerycznym. W dalszej perspektywie czasu, przewidywane jest rozwinięcie systemu dla poszczególnych rodzin komponentów takich jak np. poszycia, kabiny, dachy, podwozia itp. Takie podejście pozwoli stworzyć bazę preferowanych rozwiązań, która usprawni proces projektowy i ograniczy przeszukiwany obszar rozwiązań podczas optymalizacji.

Warto zaznaczyć, że opracowany system jest niezwykle interdyscyplinarny. Stworzenie systemu wymagało połączenia wiedzy teoretycznej z takich dziedzin jak spawalnictwo, symulacje numeryczne, informatyka, inżynieria materiałowa oraz teorii projektowania oprzyrządowania spawalniczego a także szerokiej wiedzy praktycznej dotyczącej pojazdów szynowych. Dzięki szerokiemu zgłębieniu problematyki możliwe było wdrożenie opracowanego rozwiązania w przemyśle. System może rozwiązywać problemy nie tylko dotyczące komponentów spawanych pojazdów szynowych, ale może również zostać zaadoptowany w innych gałęziach przemysłu.

Efekty pracy nad wdrożeniem były częścią projektu zgłoszonego w ramach corocznego konkursu dotyczącego innowacyjnych rozwiązań, organizowanego przez grupę Alstom. W konkursie mogli więc wziąć udział inżynierowie z wszystkich możliwych lokalizacji Alstom na świecie. Projekt dotyczył zastosowania stali Magnelis (ArcelorMittal) dla różnych obszarów w pojazdach szynowych i zdobył pierwsze miejsce w kategorii „Small but smart” spośród ponad 1100 projektów zgłoszonych do konkursu.

7 Bibliografia

1. Aalami-aleagha M. E., Eslampanah A., Mechanical constraint effect on residual stress and distortion in T-fillet welds by three-dimensional finite element analysis, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part B*, 227 (2): 315-323, 2012
2. Adak M., Mandal N.R., Numerical and experimental study of mitigation of welding distortion, *Applied Mathematical Modelling*, Volume 34 (1), 146-158, 2010
3. Altair HyperWorks helpdesk
4. Ando Y., Yagawa G., Hayase Y., Evaluation of induction heating stress improvement (IHSI) treatment applied to nuclear primary piping, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Volume 10 (5), 399-406, 1982
5. Attarha M. J., Sattari-Far I., Study on welding temperature distribution in thin welded plates through experimental measurements and finite element simulation, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 211 (4), 688-694, 2011
6. Bachorski A., Painter, M.J., Smailes A. J., Wahab M. A., Finite-element prediction of distortion during gas metal arc welding using the shrinkage volume approach, *Journal of Materials Processing Technology*, Volumes 92-93, 405-409, 1999
7. Bąk R., Burczyński T., *Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2001
8. Bijak-Żochowski M., Dietrich M., Kacperski T., Stupnicki J., Szala J., Witkowski J., *Podstawy konstrukcji maszyn*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1999
9. Bishop C., *Neural Networks for Pattern Recognition*, University Press, London, 1995
10. Burczyński T., Kuś W., Beluch W., Długosz A., Poteralski A., Szczepanik M., *Intelligent Computing in Optimal Design*, Volume 261, Springer, 2020
11. Chang P. Teng T., Numerical and experimental investigations on the residual stresses of the butt-welded joints, *Computational Materials Science*, Volume 29 (4), 511–522, 2004
12. Chen J., Wu. C. S., Chen M. A., Improvement of welding heat source models for TIG-MIG hybrid welding process, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 16 (4), 485-493, 2014
13. Christensen N., Davies V.d.L., Gjermundsen K., Distribution of temperatures in arc welding, *British Welding Journal*, Volume 12, 54–75, 1965
14. Cifuentes A., Kalbag A., A performance study of tetrahedral and hexahedral elements in 3-d finite element structural analysis, *Finite Elements Analysis and Design*, Volume 12, 313–318, 1992
15. Cook D.F., Ragsdale C.T., Major R., Combining a neural network with a genetic algorithm for process parameter optimization, *Engineering applications of artificial intelligence*, Volume 13 (4), 391-396, 2000
16. Cosimo A., Cardona A., Idelsohn S.R., General treatment of essential boundary conditions in reduced order models for non-linear problems, *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, Volume 3 (1), 626-636, 2010
17. Deng D., FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects, *Materials & Design*, Volume 30, 359-366, 2009

18. Deng D., Liang W., Investigating influence of external restraint on welding distortion in LAHS steel thin-plate structures by means of integrated computational approach, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 20, 2960-2976, 2022
19. Deng D., Murakawa H., Shibahara M., Investigations on welding distortion in an asymmetrical curved block by means of numerical simulation technology and experimental method, *Computational Materials Science*, Volume 48 (1), 187-194, 2010
20. Fachinotti V., Cardona A., Huespe A., A fast convergent and accurate temperature model for phase-change heat conduction, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Volume 44, 1863–1884, 1999
21. Fachinotti V., Cardona A., Huespe A., Numerical simulation of conduction-advection problems with phase change, *Latin American Applied Research*, Volume 31, 31–36, 2001.
22. Farias R.M., Teixeira P.R.F., Vilarinho L.O., Variable profile heat source models for numerical simulations of arc welding processes, *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 179, 2014
23. Ferenc K., Ferenc J., *Konstrukcje spawane. Połączenia*, Polskie Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 2018
24. Ferenc K., *Spawalnictwo*, Polskie Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 2016
25. Francis M., Rahman S., Probabilistic analysis of weld cracks in center-cracked tension specimens, *Computers and Structures*, Volume 76, 483–506, 2000
26. Fu G., Lourenco M. I., Duan M., Estefen S. F., Effect of boundary conditions on residual stress and distortion in T-joint welds, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 102, 121-135, 2014
27. Gadallah R., Murakawa H., Shibahara M., Thickness and weld orientation effects on fatigue crack growth after a single tensile overload, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Volume 206, 2023
28. Gery D., Long H., Maropoulos P., Effects of welding speed, energy input and heat source distribution on temperature variations in butt joint welding, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 167 (1-3), 393-401, 2005
29. Gimenez G., Errera M., Baillis D., Smith Y., Pardo F., Analysis of Dirichlet-Robin interface condition in transient conjugate heat transfer problems. Application to a flat plate with convection, *European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics*, May 2015
30. Goldak J., Chakravarti A., Bibby M., A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical Transactions B*, Volume 15, 299–305, 1984
31. Goldberg D. E., *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1989
32. Haque Rashedul S., Investigation on welding defects of alloys using TIG and MIG welding, *Hybrid Advances*, Volume 3, 2023
33. Heinze C., Schwenk C., Rethmeier M., Numerical calculation of residual stress development of multi-pass gas metal arc welding, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 72, 12-19, 2012
34. Heinze C., Schwenk C., Rethmeier M., Numerical calculation of residual stress development of multi-pass gas metal arc welding under high restraint conditions, *Materials & Design*, Volume 35, 201-209, 2012

35. Huang H-Y., Effects of activating flux on the welded joint characteristics in gas metal arc welding, *Materials & Design*, Volume 31 (5), 2488-2495, 2010
36. Hughes T., *The Finite Element Method. Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*, Prentice-Hall, 1987
37. Karadeniz E., Ozsarac U., Yildiz C., The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes, *Materials & Design*, Volume 28 (2), 649-656, 2007
38. Karayel E., Bozkurt Y., Additive manufacturing method and different welding applications, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 9 (5), 11424-11438, 2020
39. Korbicz J., Obuchowicz A., Uściński D., *Sztuczne sieci neuronowe*, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 1994
40. Li X., Hu L., Fang S., Deng D., Influence of clamping on out-of-plane deformation in thin-plate mild steel welded structures, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 25, 4380-4395, 2023
41. Li X., Hu L., Fang S., Deng D., Influence of contact behavior on welding distortion and residual stress in a thin-plate butt-welded joint performed by partial-length welding, *Thin-Walled Structures*, Volume 176, 109-309, 2022
42. Lindgren L.E., Finite element modeling and simulation of welding. part 2: Improved material modelling, *Journal of Thermal Stresses*, Volume 2 (3), 195–231, 2001
43. Łukomski A., Skurcze i inne odkształcenie spawalnicze, *Projektowanie konstrukcje inżynierskie*, Marzec 2014, dostępny: <https://www.konstrukcjeinzynierskie.pl/2010/123-zyczenie-internautow/na-zyczenie-internautow-2014/1172-skurcze-i-inne-odkształcenia-spawalnicze?showall=1>, 1 czerwca 2023
44. Łukomski A., Skurcze spawalnicze i ich wpływ w budowie przyrządów spawalniczych, *Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich (SIMP) oddział w Poznaniu*, Październik 2020, dostępny: <https://www.simp-poznan.pl/file/page/142/skurczespawalniczeichwplywnabudowaprzyrzadow-604df16f67b304.60134746.pdf>, 1 czerwca 2023
45. Ma N., Huang H., Murakawa H., Effect of jig constraint position and pitch on welding deformation, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 221, 154-162, 2015
46. Madavi K.R., Jogi B.F., Lohar G.S., Metal inert gas (MIG) welding process: A study of effect of welding parameters, *Materials today: proceedings*, Volume 51 (1), 690-698, 2022
47. Majchrzak E., Mochnacki B., *Metody numeryczne podstawy teoretyczne, aspekty praktyczne i algorytmy*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2004
48. Masters T., *Sieci neuronowe w praktyce*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1996
49. Mazumder S., *Numerical methods for partial differential equations. Finite difference and finite volume methods*, ELSEVIER, 2016
50. Meng X., Qin G., Zhang Y., Fu B., Zou Z., High speed TIG–MAG hybrid arc welding of mild steel plate, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 217 (11), 2417-2424, 2014
51. Nakagawa T., Umeda T., Murata J., Kamimura Y., Niwa N., Deformation behavior during solidification of steels, *ISIJ International*, Volume 35 (6), 723–729, 1995

52. Oficjalna strona internetowa dystrybutora Leica, Hexagon, <https://hexagon.com/products/leica-absolute-tracker-at500>, 14 sierpnia 2023
53. Park J., U., An G., Lee H., W., Effect of external load on angular distortion in fillet welding, *Materials & Design*, Volume 42, 403-410, 2012
54. Pfrommer J., Zimmerling C., Liu J., Kärger L., Henning F., Beyerer J., Optimisation of manufacturing process parameters using deep neural networks as surrogate models, *Procedia CIRP*, Volume 72, 426-431, 2018
55. Poteralski A., Szczepanik M., Burczyński T., Immune optimal design of 2-D and 3-D structures, *Artificial intelligence and soft computing*, 14th International Conference, ICAISC 2015, 471-482, Springer, 2015
56. Rakowski G., Kacprzyk Z., *Metoda Elementów Skończonych w mechanice konstrukcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1993
57. Rochalski D., Golański D., Chmielewski T. M., Modelowanie spawalniczego źródła ciepła w procesie spawania hybrydowego, *Przegląd spawalnictwa*, Volume 89, 98-103, 2017
58. Rosca A.S., Rosca D., About using the Dirichlet boundary conditions in heat transfer equation solved lay finite element method, *International Journal of Computers, Communications & Control*, Volume 1, 405-409, 2006
59. Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L., *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, Polskie Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1997
60. Schenk T., Richardson I. M., Kraska M., Ohnimus S., A study on the influence of clamping on welding distortion, *Computational Materials Science*, Volume 45 (4), 999-1005, 2009
61. Seles K., Perić M., Tonković Z., Numerical simulation of a welding process using a prescribed temperature approach, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 145, 49-57, 2018
62. Siva Shanmugam N., Buvanashakaran G., Sankaranarayananasamy K., Ramesh Kumar S., A transient finite element simulation of the temperature and bead profiles of T-joint laser welds, *Materials & Design*, Volume 31 (9), 4528-4542, 2010
63. Szabo T., On the On the Discretization Time-Step in the Finite Element Theta-Method of the Two-Dimensional Discrete Heat Equation, *Large-Scale Scientific Computing*, Volume 591, 626-636, 2010
64. Tadeusiewicz R., *Elementarne wprowadzenie do techniki sieci neuronowych z przykładami*, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 1998
65. Tadeusiewicz R., *Sieci neuronowe*, Akademicka Oficyna Wydawnicza RM, Warszawa, 1993
66. Tassouli S., Lissner A., A neural network approach to solve geometric programs with joint probabilistic constraints, *Mathematics and Computers in Simulation*, Volume 205, 765-777, 2023
67. Urbański T., Taczała M., Prediction of a transverse shrinkage of butt welded joints in shipyard conditions using the design of experimental approach, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Volume 12, 784-798, 2020
68. Varshney D., Kumar K., Application and use of different aluminium alloys with respect to workability, strength and welding parameter optimization, *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 12 (1), 1143-1152, 2021

69. Venkatkumar D., Durairaj R., Effect of Boundary Conditions on Residual Stresses and Distortion in 316 Stainless Steel Butt Welded Plate, *High Temperature Materials and Processes*, Volume 38, 827-836, 2019
70. Villarrubia G., De Paz J. F., Chamoso P., De la Prieta F., Artificial neural networks used in optimization problems, *Neurocomputing*, Volume 272, 10-16, 2018
71. Wang B., Jack Hu S., Sun L., Freiheit T., Intelligent welding system technologies: State-of-the-art review and perspectives, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 56, 11424-11438, 2020
72. Wang G.G., Sahn S., Review of metamodeling techniques in support of engineering design optimization, *Journal of Mechanical design*, Volume 129 (4), 370-380, 2007
73. Wang J., Zhou X., Yi B., Buckling distortion investigation during thin plates butt welding with considering clamping influence, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Volume 37, 278-290, 2022
74. Winczek J., New approach to modeling of temperature field in surfaced steel elements, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 54 (21-22), 4702-4709, 2011
75. Wrochna P., Odształcenia spawalnicze, *Poradnik inżyniera*, Luty 2022, dostępny: <https://poradnikinzyniera.pl/odsztalcenia-spawalnicze/>, 1 czerwca 2023
76. Wu X., Zhao X., Chen J., Zhang Z., Wu C., Simulation of the influence of welding parameters on weld pool behavior during a TIG-MIG hybrid welding process, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 79, 460-475, 2022
77. Yaghi A., Becker A., State of the art review - weld simulation using finite element methods, Technical report, University of Nottingham, UK, 2004
78. Zadorożny T., Szczepanik M., Numerical simulation of the welding process, the influence of constraint points locations on thermal deformations, *Scientific-Expert conference on railways RAILCON 2020*, 145-148, Nis 2020
79. Zhao Y., Chung H., Numerical simulation of droplet transfer behavior in variable polarity gas metal arc welding, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 111 , 1129-1141, 2017
80. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z., *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, ELSEVIER, 2013

STRESZCZENIE

Minimalizacja odkształceń cieplnych w wyniku inteligentnej optymalizacji rozmieszczenia punktów mocowań w obszarze komponentu spawanego

Optymalizacja procesów technologicznych z powodu wielu czynników mających wpływ na ich przebieg jest wyjątkowo trudna oraz czasochłonna. Prawidłowo przeprowadzona symulacja procesu wraz z jego optymalizacją pozwala usprawnić etap produkcji przyczyniając się do znacznej redukcji kosztów związanych z czasem technologicznym oraz potencjalnymi naprawami.

W niniejszej pracy przedstawiono opis problemu dotyczącego trwałych odkształceń termicznych po procesie spawania. Omówiono różnego rodzaju wady oraz metody ich naprawy wskazując na wyraźną potrzebę ich ograniczenia, które przekłada się na stabilizację procesu produkcyjnego oraz poprawę jakości produktu. W dalszej części dokonano opisu opracowanego systemu służącego do symulacji procesu spawania oraz optymalizacji rozmieszczenia punktów mocowań w obszarze komponentu spawanego w celu minimalizacji odkształceń cieplnych. Do realizacji postawionego zadania użyto komercyjnego oprogramowania HyperWorks, który został połączony z autorskimi algorytmami wspomagającymi proces tworzenia modelu numerycznego oraz optymalizacji. W pracy przedstawiono również przykład dla stosunkowo prostej konstrukcji, dla której szczegółowo opisano schemat postępowania oraz działania podczas prowadzenia symulacji procesu i optymalizacji. Dodatkowo w celu walidacji opracowanego systemu przeprowadzono złożoną symulację numeryczną procesu spawania poszycia pojazdu kolejowego oraz optymalizację doboru punktów podparcia. Analiza dokładnie odwzorowywała rzeczywiste warunki oraz parametry jakie są używane podczas procesu produkcyjnego. Uwzględniono również poszczególne etapy produkcji oraz sekwencje spawania poszczególnych komponentów. Otrzymane wyniki porównano z pomiarami rzeczywistymi konstrukcji po zakończonym procesie co pozwoliło potwierdzić słuszność przyjętych założeń podczas tworzenia omawianego systemu.

Zaprezentowany system optymalizacji oraz podejście do problemu wskazują, iż na wstępnym etapie projektowania konstrukcji oraz planowania procesu produkcyjnego możliwy jest odpowiedni dobór rozmieszczenia punktów mocowań tak aby ograniczyć odkształcenia cieplne. Omówione rozwiązanie zostało z powodzeniem wdrożone w przedsiębiorstwie.

ABSTRACT

Minimization of thermal distortion by intelligent optimization of the arrangement of fixing points in the area of the welded component

Optimization of technological processes is extremely difficult and time-consuming due to many factors affecting their course. A properly conducted simulation of the process along with its optimization allows you to improve the production stage, contributing to a significant reduction of costs related to technological time and potential repairs.

This paper presents a description of the problem of permanent thermal deformation after the welding process. Various types of defects and methods of their repair are discussed, pointing to the clear need to reduce them, which translates into stabilization of the production process and improvement of product quality. In the following part, a description of the developed system for simulating the welding process and optimizing the arrangement of fixing points in the area of the welded component in order to minimize permanent deformations was made. To implement the task, the commercial HyperWorks software was used, which was combined with proprietary algorithms supporting the process of creating a numerical model and optimization. The paper also presents a theoretical example for a relatively simple construction for which the procedure and actions during the process simulation and optimization are described in detail. Additionally, to validate the developed system, a complex numerical simulation of the railway vehicle body shell welding process was conducted, along with optimizing the selection of fixing points. The analysis precisely replicated real conditions and parameters used during the manufacturing process. The analysis accurately reproduced the actual support conditions and parameters that are used during the production process. The individual stages of production and the welding sequences of individual components are also taken into account. The obtained results were compared with the actual measurements of the structure after the completion of the process, which allowed to confirm the validity of the assumptions made during the creation of the discussed system.

The presented optimization system and the approach to the problem indicate that at the initial stage of designing the structure and planning the production process, it is possible to properly select the arrangement of fixing points to limit thermal deformations. The discussed solution has been successfully implemented in the company.