

**Prace badawczo rozwojowe nad opracowaniem
konstrukcji elementów umożliwiających załadunek,
transport i montaż morskich wież wiatrowych przy
wykorzystaniu metod określających zmiany materiału
spawanego**

Raport z badań

TECHNIKA I TECHNOLOGIA MECHANICZNA

DYNPAP

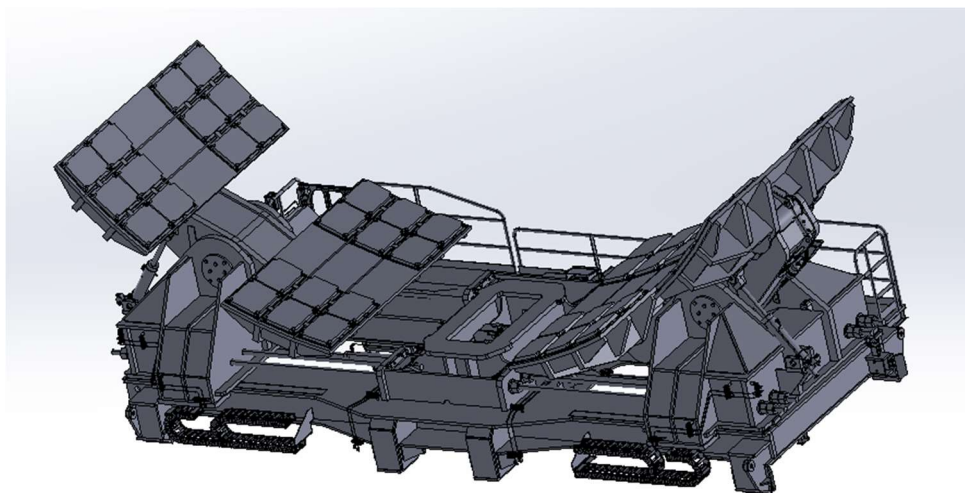
TECHNOLOGY AND PRODUCT ENGINEERING

1. Wstęp

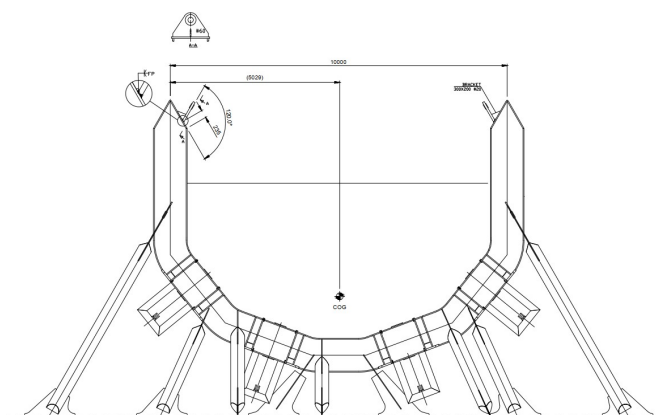
Prace wykonane w ramach realizacji projektu nr RPZP.01.01.00-32-0032/20 współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Zachodniopomorskiego na lata 2014 – 2020, działanie 1.1 Projekty badawczo-rozwojowe przedsiębiorstw, Typ 2 projektu: Projekty badawczo-rozwojowe przedsiębiorstw ukierunkowane na wdrożenie wyników prac B+R w działalności gospodarczej. Projekt konstrukcji elementów umożliwiających załadunek, transport i montaż morskich wież wiatrowych przy wykorzystaniu metod określających zmiany materiału spawanego zakłada możliwość kompensowania odkształceń wynoszących 7 mm, redukcję masy konstrukcji o 35% w stosunku do istniejących rozwiązań, montaż wykorzystujący grawitację oraz uniwersalność konstrukcji względem rozmiaru transportowanych elementów i ich masy.

2. Symulacja analityczna

W celu zaprojektowania konstrukcji charakteryzującej się ww. cechami konieczne było przeprowadzenie kompleksowej analizy wytrzymałościowej konstrukcji metodą MES oraz wykonanie badań analitycznych procesów spawalniczych.

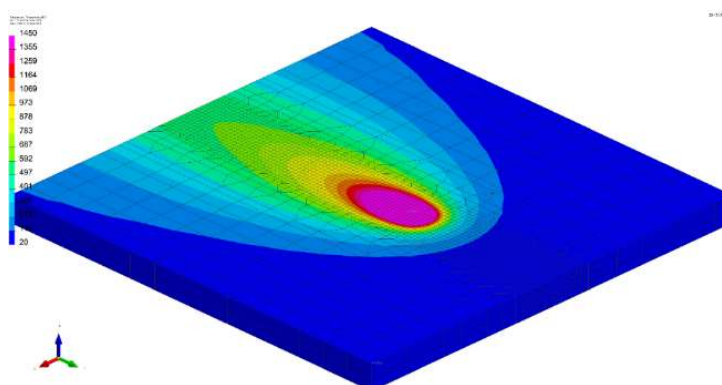


Rysunek 1 Wstępny model złożenia konstrukcji stalowej



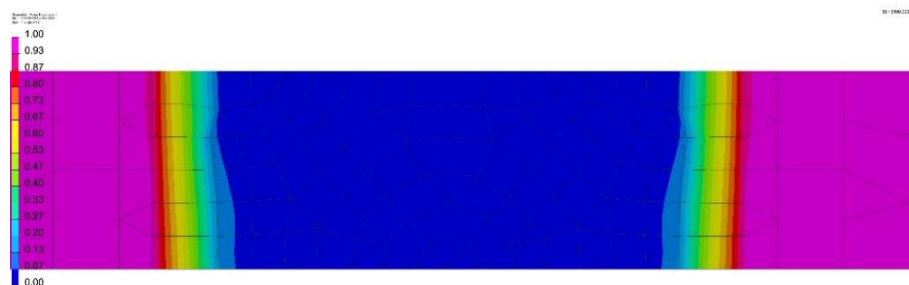
Rysunek 2 Projekt modułowej i uniwersalnej względem rozmiaru transportowanych elementów konstrukcji typu Cradle

W pierwszej kolejności wykonano badania analityczne spoin w oprogramowaniu SYSWELD, na podstawie których określono wpływ parametrów spawania na wartość naprężeń występujących w konkretnych złączach spawanych.

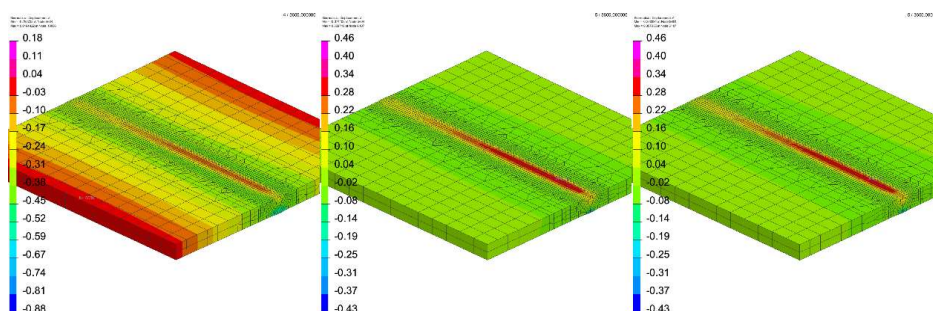


Rysunek 3 Rozkład temperatur w złączy podczas symulowanego cyklu spawania metodą 138/136

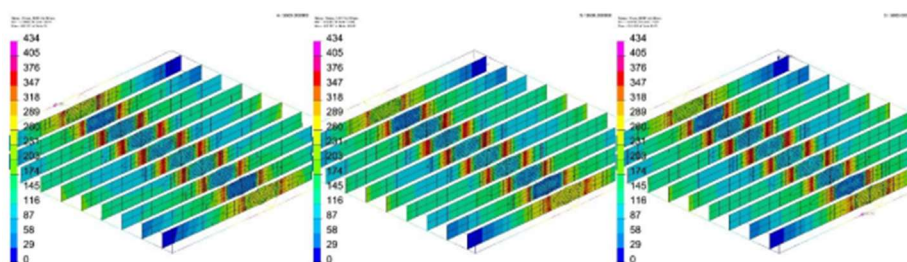
Określono również rozkład faz strukturalnych na przekroju złącza, co w odniesieniu do badań metalograficznych mikroskopowych pozwoliło na porównanie struktury uzyskanej podczas symulacji do struktur z fizycznych złączy próbných. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono krytyczne miejsca styku między poszczególnymi elementami konstrukcji (głównie ze względu na występujące w złączach naprężenia rozciągające i ścinające), przeprowadzono wstępną analizę stateczności spoin w odniesieniu do całości konstrukcji, a także opracowano sposób eliminowania niezgodności spawalniczych.



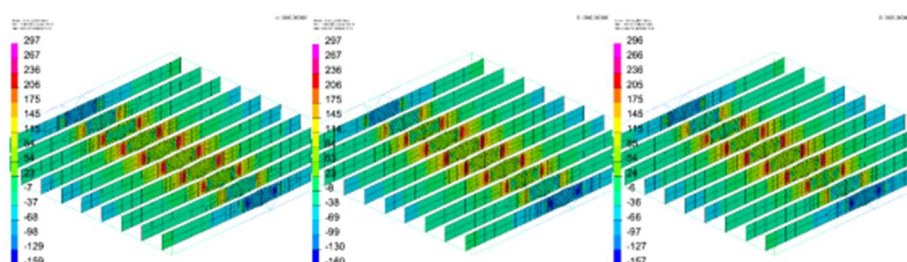
Rysunek 4 Rozkład faz strukturalnych na przekroju złącza po procesie spawania 138/136



Rysunek 5 Symulacja przemieszczeń dla blachy spawanej metodą 138/136 (kolejno: bez utwardzenia, z usunięciem utwardzenia po 1800 s, z usunięciem utwardzenia po 75 s)



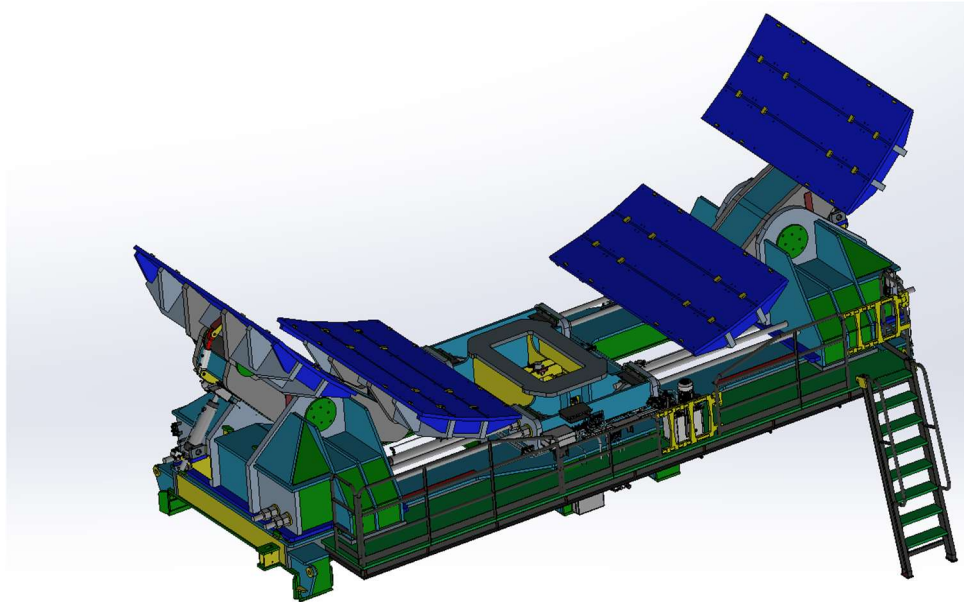
Rysunek 6 Symulacja naprężeń wg Misesa dla blachy spawanej metodą 138/136 (kolejno: bez utwardzenia, z usunięciem utwardzenia po 1800 s, z usunięciem utwardzenia po 75 s)



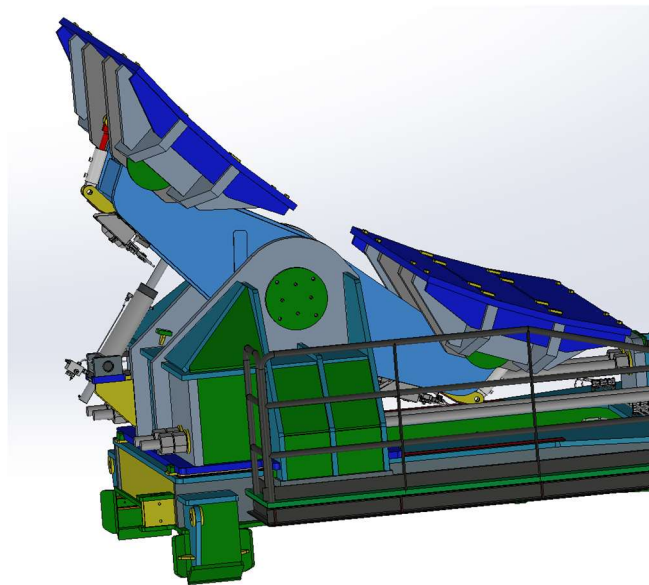
Rysunek 7 Symulacja naprężeń średnich dla blachy spawanej metodą 138/136 (kolejno: bez utwardzenia, z usunięciem utwardzenia po 1800 s, z usunięciem utwardzenia po 75 s)

Po wykonaniu symulacji analitycznych spoin oraz rzeczywistych prób spawania kolejnym krokiem było przeprowadzenie kompleksowej analizy wytrzymałościowej

konstrukcji metodą MES w oprogramowaniu Solidworks z wykorzystaniem wiedzy uzyskanej w poprzednich badaniach.



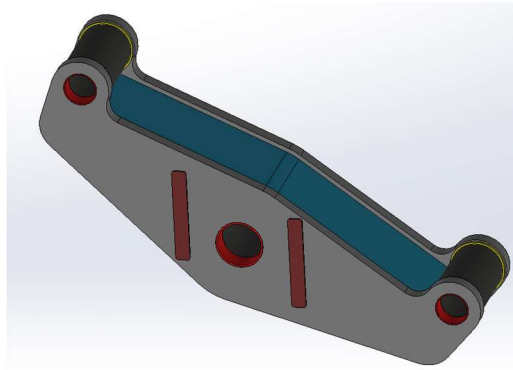
Rysunek 8 Złożenie konstrukcji stalowej z podziałem na elementy składowe do analizy MES



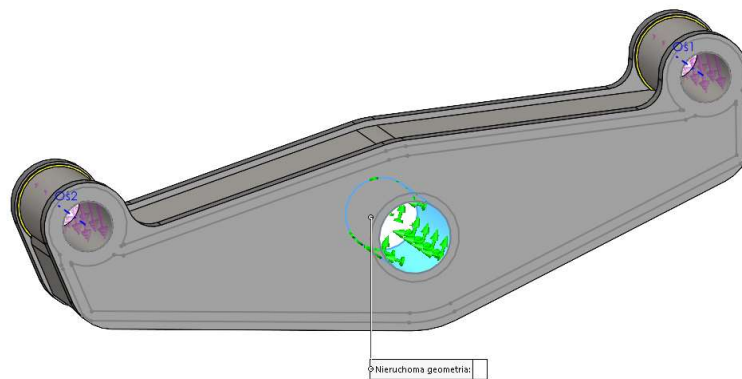
Rysunek 9 Wycinek złożenia konstrukcji stalowej z podziałem na elementy składowe do analizy MES

Złożenie konstrukcji elementów umożliwiających załadunek, transport i montaż morskich wież wiatrowych podzielono na mniejsze części, które poddano osobnym analizom MES. Na tej podstawie wyznaczono możliwości odkształceń poszczególnych

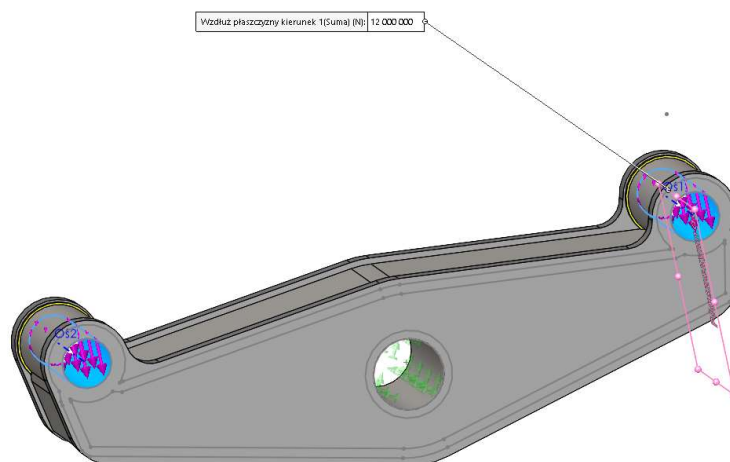
składowych, a następnie odniesiono je do konstrukcji jako całości. Oceniono również możliwość redukcji masy całości konstrukcji na założonym poziomie 35%. Przykład analizy MES dla jednego elementu składowego konstrukcji przedstawiono na Rysunkach 10 – 15.



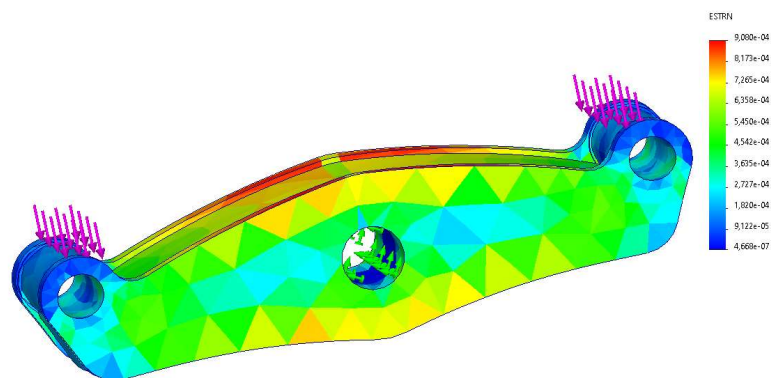
Rysunek 10 Element konstrukcji wyodrębniony do analizy MES



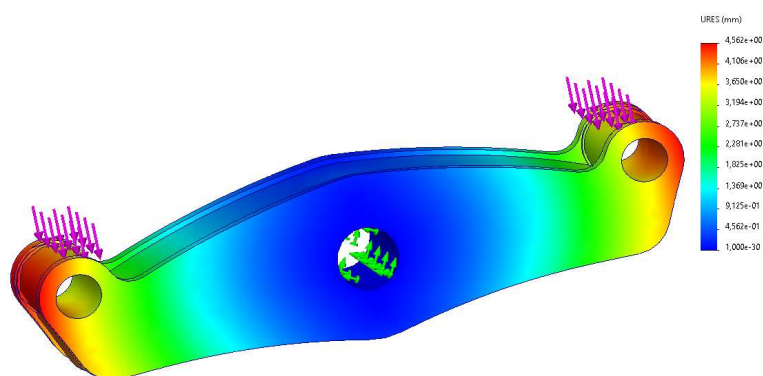
Rysunek 11 Element składowy do analizy MES z zadaniem utwierdzeniem



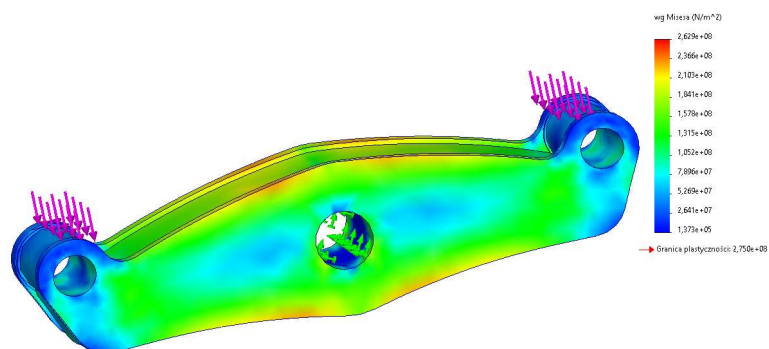
Rysunek 12 Element składowy do analizy MES z zadaniem obciążeniami



Rysunek 13 Analiza odkształcenia równoważnego ESTRN w elemencie składowym



Rysunek 14 Analiza wypadkowego przemieszczenia URES w elemencie składowym



Rysunek 15 Analiza maksymalnego naprężenia zredukowanego wg Misesa w elemencie składowym

3. Weryfikacja doświadczalna wyników badań analitycznych spoin

W celu weryfikacji symulowanych parametrów spawania wykonano rzeczywiste próby spawalnicze, które poddano badaniom nieniszczącym (NDT) oraz niszczącym (DT). Do wykonania złączy próbnych wybrano parametry, które wg analizy symulacyjnej

pozwoły na największą kompensację odkształceń oraz umożliwiły wykonanie połączeń o jakości wymaganej normami. Wykonano badania nieniszczące wizualne (VT), magnetyczno-proszkowe (MT) oraz ultradźwiękowe (UT) i żadne z nich nie wykazało niezgodności w złączach próbnych.

Tabela 1 Parametry spawania złącza próbnego

Run type	Welding process / Consumable Id.	Minimum - Maximum						Average
		Gas [l/min]	Current [A]	Voltage [V]	Wire feed [m/min]	Travel speed [mm/min]	Heat input [kJ/mm]	Heat input [kJ/mm]
Root	138 / A	15-18	95	15,0	2,0	59	1,16	1,16
Filling	136 / B	15-18	220 - 230	25,0	8,5 - 9,2	185 - 212	1,25 - 1,50	1,37
Capping	136 / B	15-18	208 - 220	23,0 - 23,5	8,5	316 - 333	0,73 - 0,77	0,74



Rysunek 16 Makrostruktura złącza próbnego

Do wykonanych badań DT należą: statyczna próba rozciągania (pozwalająca na określenie wytrzymałości na rozciąganie R_m), próba zginania, badanie udarności, badanie twardości HV10 oraz badanie metalograficzne makroskopowe. Wyniki badań przedstawiono w poniższych tabelach.



Rysunek 17 Próbką po statycznej próbie rozciągania złącza próbnego

Tabela 2 Wyniki statycznej próby rozciągania złącza próbnego

OZNACZENIE PRÓBK	WYMIARY PRÓBK [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [kN]	R_m [MPa]	MIEJSCE ZERWANIA
1.1	25,00x12,02	300,5	162,955	542	materiał podstawowy
1.2	25,01x12,05	301,4	163,888	544	materiał podstawowy

Tabela 3 Wyniki próby zginania złącza próbnego

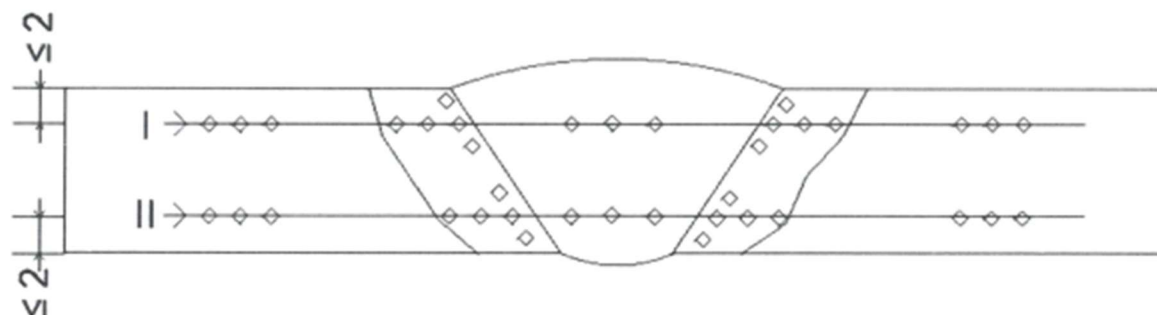
OZNACZENIE PRÓBK	WYMIARY PRÓBK [mm]	ŚREDNICA TRZPIENIA [mm]	ODLEGŁOŚĆ MIĘDZY PODPORAMI [mm]	KĄT GIĘCIA [°]	RODZAJ I WIELKOŚĆ NIEZGODNOŚCI
1.1	10x12	40	70	180	brak nieciągłości
1.2	10x12	40	70	180	brak nieciągłości
1.3	10x12	40	70	180	brak nieciągłości
1.4	10x12	40	70	180	brak nieciągłości

Tabela 4 Wyniki próby udarności złącza próbnego

OZNACZENIE PRÓBK	TEMPERATURA BADANIA [°C]	MIEJSCE NACIĘCIA	PRACA ŁAMANIA [J]			
			NR PRÓBK			ŚREDNIA
			1	2	3	
1.1	-40	VWT 0/1	54,9	52,4	58,2	55,2
1.2	-40	VHT 0/1	98,2	52,2	67,3	72,6
1.3	-40	VHT 2/1	59,4	181,4	50,6	97,1

Tabela 5 Wyniki badania twardości złącza próbnego

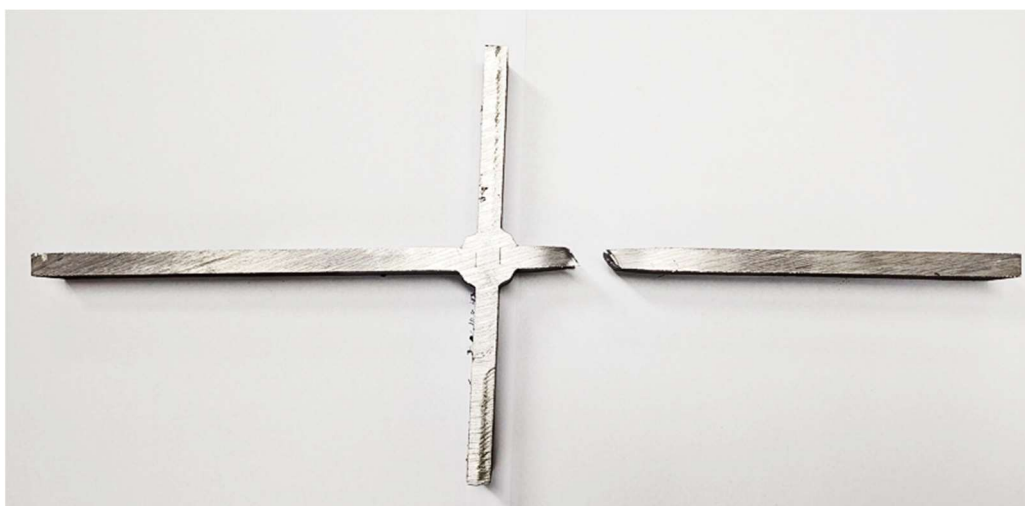
OZNACZENIE PRÓBK	LINIA POMIAROWA	WYNIKI POMIARÓW																		
		MATERIAŁ PODSTAWOWY			SWC					SPOINA			SWC					MATERIAŁ PODSTAWOWY		
1.1	I	170	170	171	174	191	206	275	304	217	225	226	304	323	316	213	180	167	165	165
	II	168	166	164	176	193	207	217	208	186	187	192	214	205	222	178	177	152	157	157
1.2	I	168	165	171	177	203	240	270	297	221	228	228	275	271	273	209	190	166	166	168
	II	166	171	168	184	191	198	195	205	185	177	199	198	207	203	186	184	159	160	163



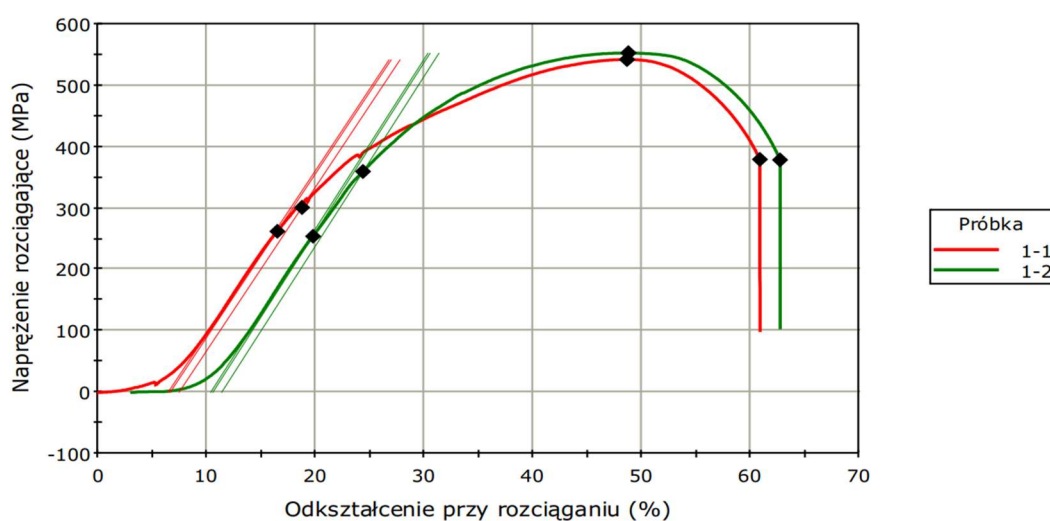
Rysunek 18 Szkic odcisków dla badania twardości złącza próbnego

Na podstawie powyższych badań stwierdzono, że parametry wyznaczone metodą analizy symulacyjnej procesów spawalniczych pozwalają na uzyskanie w pełni funkcjonalnych złączy pozbawionych wad oraz cechujących się właściwościami mechanicznymi zgodnymi z wymaganiami norm.

W kolejnym kroku wykonano próby technologiczne złączy spawanych, które zakwalifikowano jako najbardziej obciążone w konstrukcjach elementów umożliwiających załadunek, transport i montaż morskich wież wiatrowych. Połączenia te poddano działaniu obciążeń statycznych oraz dynamicznych w celu określenia późniejszej zdolności kompensacji odkształceń w rzeczywistej konstrukcji.



Rysunek 19 Złącze produkcyjne po statycznej próbie rozciągania



Rysunek 20 Wykres napężenie - wydłużenie ze statycznej próby rozciągania złącza krzyżowego

Tabela 6 Wyniki statycznej próby rozciągania złącza krzyżowego

OZNACZENIE PRÓBK	WYMIARY PRÓBK [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [kN]	R_m [MPa]	MIEJSCE ZERWANIA
1-1	9,99x20,01	199,9	108,3	541,7	materiał podstawowy
1-2	9,97x20,00	199,4	110,1	552,2	materiał podstawowy

Wykonane badania niszczące prób produkcyjnych pozwoliły na określenie wytrzymałości najbardziej obciążonych połączeń w konstrukcjach elementów umożliwiających załadunek, transport i montaż morskich wież wiatrowych. Uzyskane wyniki badań w połączeniu z przeprowadzoną kompleksową analizą wytrzymałościową konstrukcji metodą MES potwierdziły możliwość zastosowania opracowanych technologii spawania do wykonania elementów umożliwiających załadunek, transport i montaż morskich wież wiatrowych zdolnych do kompensacji odkształceń wynoszących 7 mm.

Na podstawie doświadczeń zebranych z przeprowadzonych badań analitycznych spoin oraz badań złączy próbnych i rzeczywistych prób produkcyjnych kwalifikowano technologię spawania według wymagań towarzystwa klasyfikacyjnego.

4. Analiza odkształceń konstrukcji



Rysunek 21 Częściowa Integracja elementów prowadzona w warunkach kontrolowanych

W kontrolowanych warunkach produkcyjnych wykonano częściową integrację modelu w jeden układ przy wykorzystaniu laserowych instrumentów pomiarowych. Dzięki temu procesowi możliwe było bardzo dokładne określenie odkształceń powstałych po procesie spawania, które stanowią kluczową kwestię w zagadnieniach kompensacji odkształceń konstrukcji.



Rysunek 22 Integracja całości konstrukcji prowadząca do wykonania prototypów

Następnie wykonano prototypy i po uzyskaniu pozytywnych wyników badań nieniszczących przeprowadzono próbę podnoszenia za ucha zaczepowe, po której konstrukcja nie wykazała żadnych odkształceń trwałych lub innych uszkodzeń. Kolejnym krokiem była próba piętrzenia konstrukcji, czyli montaż wszystkich elementów wykorzystujący masę poszczególnych części, a następnie obciążenie całej konstrukcji ciężarem przekraczającym ciężar docelowych wież wiatrowych. Podobnie jak w przypadku poprzedniej próby, konstrukcja nie wykazała żadnych odkształceń trwałych lub innych uszkodzeń.



Rysunek 23 Konstrukcja typu Cradle przed próbami przy dużych przeciążeniach

Gotowa konstrukcja po zakończeniu prac produkcyjnych została przewieziona w miejsce odwzorowujące docelowe miejsce pracy, a następnie obciążona zgodnie z założeniami projektowymi. Za pomocą trackera laserowego Leica zmierzono odkształcenia konstrukcji pod wpływem elementów morskich wież wiatrowych różniących się obciążeniem oraz wymiarami.



Rysunek 23 Próby obciążeniowe pod ciężarem rzeczywistego elementu morskich wież wiatrowych

5. Wnioski

Wykorzystanie kompleksowej analizy wytrzymałościowej konstrukcji metodą MES oraz badań analitycznych procesów spawalniczych może stanowić dobrą praktykę inżynierską podczas projektowania i wytwarzania konstrukcji stalowych. Uzyskane wyniki w połączeniu z wynikami badań metalograficznych umożliwiają określenie zakresu parametrów spawania w odniesieniu do występujących w złączu odkształceń oraz naprężeń, dzięki czemu możliwe jest opracowanie koncepcji kompensacji odkształceń w rzeczywistej konstrukcji. Dodatkowo możliwe jest wyznaczenie krytycznych miejsc styku między poszczególnymi elementami konstrukcji (wynikających m.in. z braku możliwości przeprowadzenia badań NDT oraz występowania dużych naprężeń rozciągających lub ścinających w obrębie złącza), przeprowadzenie wstępnej analizy stateczności spoin w odniesieniu do całości konstrukcji,

a także ocena sposobów eliminowania niezgodności spawalniczych np. przez podgrzewanie wstępne elementów o większych grubościach lub przestrzeganie określonej temperatury międzyściegowej. Na podstawie badań analitycznych MES oraz CAx dla konstrukcji stalowych możliwa jest symulacja wytrzymałości oraz odkształceń konstrukcji jako całości, a także określenie, czy założony projektowo poziom redukcji masy jest możliwy do zrealizowania.