

# Porównanie właściwości złączy spawanych ze stali Domex 700 MC i Alform 700 M

## Comparison of properties of welded joint of steel Domex 700 MC and Alform 700 M

### Streszczenie

W artykule przedstawiono porównanie właściwości złączy spawanych ze stali obrabianej termomechanicznie Domex 700 MC i Alform 700 M o grubości 4 mm, wykonanych metodą spawania MAG z użyciem dwóch gatunków drutu spawalniczego. Wykonane badania metalograficzne, wytrzymałościowe i pomiary twardości pozwoliły określić strukturę i właściwości złączy oraz opracować technologię spawania dla nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych.

**Słowa kluczowe:** struktura, właściwości mechaniczne, stale wysokowytrzymałe

### Abstract

The article presents a comparison of properties of welded joints of steel, thermomechanically treated Domex 700 MC and Alform 700 M 4 mm thick made by MAG welding using two types of welding wire. Metallographic tests, strength and hardness measurements allowed to determine the structure and properties of joint, as well as to develop of welding technology for modern steel structures.

**Keywords:** structure, mechanical properties, high-strength steels

### Wstęp

Współczesne wymagania rynkowe w zakresie środków transportu oraz oczekiwania klienta narzucają wykonanie jak najlepszych, a zarazem bezpiecznych konstrukcji. W tym celu sięga się po nowoczesne materiały, które pozwalają na wykonanie lżejszych, a zarazem wytrzymałszych konstrukcji. Natomiast bardzo wysokie wymagania dotyczące jakości połączeń spawanych narzucają konieczność opracowania bardziej rygorystycznej technologii dla wykorzystywanych w produkcji nowych materiałów.

Stale o podwyższonej wytrzymałości i stale wysokowytrzymałe stały się przez ostatnie lata materiałem konstrukcyjnym coraz powszechniej wykorzystywanym w wielu sektorach przemysłowych na całym świecie. Rozpiętość między wytrzymałością na rozciąganie i granicą plastyczności produkowanych obecnie stali konstrukcyjnych przeznaczonych do spawania jest bardzo duża. Produkuje się stale o granicy plastyczności

1650÷1850 MPa oraz wytrzymałości na rozciąganie 1700÷2000 MPa. Te ostatnie oczywiście są to stale o nadzwyczaj wysokiej wytrzymałości. Aby mówić o stalach niskostopowych o wysokiej wytrzymałości przyjmuje się, że są to stale, których granica plastyczności przewyższa 550 MPa [1].

Spawanie konwencjonalnych stali niestopowych i niskostopowych, których właściwości wytrzymałościowe nie są tak duże, na ogół stawia mniejsze wymagania odnośnie do technologii spawania, jak i daje większą swobodę w projektowaniu rozwiązań konstrukcyjnych, nie sprawia też problemów podczas samego procesu spawania. Jeżeli w konstrukcji przewidziano zastosowanie stali o wysokiej wytrzymałości, to już na wstępnym etapie projektowania należy brać pod uwagę aspekty związane z wykonaniem połączeń spawanych. Głównie należy wziąć pod uwagę właściwy wybór rozmieszczenia połączeń oraz ich prawidłowy kształt. Sama technologia spawania też wymaga ostrzejszych reżimów procesu, przy czym należy zwrócić szczególną uwagę, aby złącza spawane miały jak najmniej

koncentratorów naprężeń oraz żeby były jak najmniej odkształcane plastycznie. W zakresie doboru spoiwa należy pamiętać o jak najmniejszych różnicach wytrzymałości i twardości pomiędzy materiałem podstawowym a metalem spoiny, gdyż większe różnice mogą oddziaływać jako lokalne koncentratory naprężeń.

poddane procesowi spawania przy użyciu wszystkich powszechnie stosowanych metod. Dzięki tak niskiej zawartości składników stopowych nie są podatne na pęknięcia wodorowe. Produkowane w zakresach grubości do 10 mm nie wymagają podgrzewania wstępnego przed spawaniem [4, 5].

## Charakterystyka stali Domex 700 MC i Alform 700 M

Domex 700 MC oraz Alform 700 M są stalami wysoko-wytrzymałymi walcowanymi na gorąco w procesie termomechanicznym z przyspieszonym chłodzeniem, wskazującymi minimalną granicę plastyczności 700 MPa. Mają wysoką wytrzymałość w połączeniu z dobrą ciągliwością i plastycznością. Wykorzystywane są głównie do produkcji maszyn budowlanych, górniczych, mostów, konstrukcji budynków, dźwigów, pomp oraz do wielu innych konstrukcji, jak np. środki transportu, w których istnieje potrzeba zmniejszenia ciężaru, przy jednoczesnym zwiększeniu nośności konstrukcji. Wszystkie te zalety stali w połączeniu z dobrą formowalnością umożliwiają obniżenie kosztów całkowitych konstrukcji. Stosowanie wysokowytrzymałych stali przynosi także korzyści dla środowiska naturalnego, m.in. przez mniejsze zużycie surowców, energii, mniejszą masę, co pozwala na zwiększenie ładunku oraz wydłużenie okresu żywotności konstrukcji [4, 5].

Skład chemiczny stali Domex 700 MC i Alform 700 M podano w tablicach I i II. Gatunki tych stali zawierają mało węgla, ale są precyzyjnie uzupełnione przez inne pierwiastki uszlachetniające, takie jak: niob, tytan i wanad. Ekwiwalent węgla wg danych producenta zawartych w atestach materiałowych dla użytych w badaniach materiałów CE = 0,39%. Stale te są bardzo dobrą alternatywą dla konstrukcji kształtowanych na zimno z przeznaczeniem do spawania [4, 5].

Zarówno stal Domex 700 MC, jak i Alform 700 M charakteryzują się bardzo dobrą spawalnością. Ze względu na małą zawartość węgla, siarki i fosforu mogą być

## Przebieg spawania

Na potrzeby technologii spawania wykonano po dwa złącza próbne ze stali wysokowytrzymałej Domex 700 MC oraz Alform 700 M, każde o grubości 4 mm. W wykonanych złączach doczołowych zastosowano rowek spawalniczy na I, a celem zapewnienia prawidłowego formowania grani użyto podkładki ceramicznej. Spawanie zostało wykonane ręcznie z wykorzystaniem metody spawania MAG w procesach 135 i 138, z zastosowaniem parametrów spawania z wcześniej przygotowanego WPS.

Do spawania użyto następujących materiałów dodatkowych:

- drutu litego BÖHLER X 70-IG Ø1,0 mm,
- drutu proszkowego z rdzeniem metalicznym BÖHLER Alform 700-MC Ø1,2 mm,
- podkładki ceramicznej PS-52 F20,
- gazu osłonowego 82% Ar + 18% CO<sub>2</sub>.

## Wyniki badań

Po zakończeniu spawania złącza zostały poddane badaniom wizualnym wg PN EN 970, a następnie badaniom magnetyczno-proszkowemu wg PN-EN 1290 oraz badaniom objętościowym (RTG) wg PN-EN 1435. Żadne z badań nieniszczących nie wykazały obecności w spoinach niezgodności spawalniczych zgodnie z obowiązującymi normami. Złącza próbne wolne od wad i niezgodności spawalniczych zostały poddane następnie badaniom właściwości mechanicznych i badaniom metalograficznym.

**Tablica I.** Skład chemiczny stali Domex 700 MC [4]

**Table I.** The content of individual elements in steel Domex 700 MC [4]

C, % max	Si, % max	Mn, % max	P, % max	S, % max	Al, % max	Nb, % max	V, % max	Ti, % max
0,12	0,10	2,10	0,025	0,010	0,015	0,09	0,20	0,15

**Tablica II.** Skład chemiczny stali Alform 700 M

**Table II.** The content of individual elements in steel Alform 700 M [5]

C, % max	Si, % max	Mn, % max	P, % max	S, % max	Al., % max	Nb, % max	Cr, % max	Mo, % max	V, % max	Ni, % max	Ti, % max	B, % max
0,12	0,60	2,10	0,020	0,008	0,020	0,06	1,50	0,50	0,12	2,0	0,05	0,005

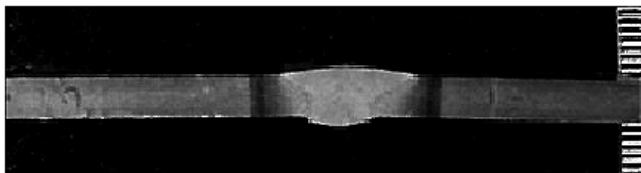
## Badania metalograficzne

Badania te należą do grupy badań niszczących. Celem przeprowadzonych badań metalograficznych złączy spawanych jest określenie ich wewnętrznej budowy oraz ocena jakości złącza [2].

## Badania makroskopowe

Polegają one na obserwacji okiem nieuzbrojonym lub przy ewentualnym powiększeniu do ok. 20x (maks. do 50x), odpowiednio przygotowanych zglądów metalograficznych, przełomów złączy lub samego materiału rodzimego [3]. Badania makroskopowe zostały wykonane z użyciem szkła powiększającego o powiększeniu 10x zgodnie z zaleceniami PN-EN 1321:2000. Badane próbki trawiono odczynnikiem Ma 11 Fe (odczynnik Adlera) w temperaturze pokojowej. Czas trawienia ok. 10 s. Na rysunkach 1÷4 przedstawiono zdjęcia makrostruktur badanych złączy.

Ujawnione struktury spoin nie wykazują niezgodności spawalniczych, wszystkie złącza spełniają poziom jakości B wg PN-EN ISO 5817. Wtopienie spoin w materiał rodzimy jest poprawne we wszystkich przypadkach. Na próbce nr 2 (rys. 2) ujawniona jest struktura dendrytyczna z kierunkiem wzrostu dendrytów przebiegającym od linii wtopienia do lica spoiny. Próbki 3 i 4 (rys. 3 i 4) wykazują niewielki brak symetrii lica względem grani, co spowodowane było prawdopodobnie brakiem prostopadłego ustawienia palnika spawalniczego względem spawanych blach. Szersza grań występująca na wszystkich próbkach jest wynikiem jej formowania na podkładce ceramicznej. Spoiny wykonane drutem proszkowym charakteryzuje łagodniejszy kształt lica.



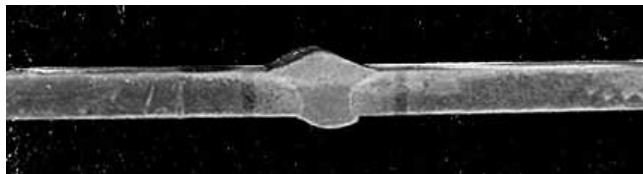
**Rys. 1.** Makrostruktura poprzecznego przekroju doczołowego. Płyta próbna nr 1. Stal Domex 700 MC. Drut lity Böhler X 70-IG Ø1,0 mm. Wtopienie prawidłowe, brak niezgodności spawalniczych

**Fig. 1.** Butt cross-sectional macrostructure. Trial plate no. 1 Domex 700 MC. Solid wire Böhler X 70-IG Ø1,0 mm. Penetration correct, no imperfections



**Rys. 2.** Makrostruktura poprzecznego przekroju doczołowego. Płyta próbna nr. 2 Stal Domex 700 MC. Drut proszkowy Böhler Alform 700-MC Ø1,2 mm. Wtopienie prawidłowe, właściwy zarys geometryczny spoiny, brak niezgodności spawalniczych

**Fig. 2.** Butt cross-sectional macrostructure. Trial plate no. 2 Domex 700 MC. Flux cored wire Böhler Alform 700-MC Ø1.2 mm. Penetration correct, correct outline geometric weld, no imperfections



**Rys. 3.** Makrostruktura poprzecznego przekroju doczołowego. Płyta próbna nr. 3 Stal Alform 700 M. Drut lity Böhler X 70-IG Ø1,0 mm. Wtopienie prawidłowe, brak niezgodności spawalniczych

**Fig. 3.** Butt cross-sectional macrostructure. Trial plate no. 3 Alform 700 M. Solid wire Böhler X 70-IG Ø1,0 mm. Penetration correct, no imperfections



**Rys. 4.** Makrostruktura poprzecznego przekroju doczołowego. Płyta próbna nr. 4 Stal Alform 700 M. Drut proszkowy Böhler Alform 700-MC Ø1,2 mm. Wtopienie prawidłowe, brak niezgodności spawalniczych

**Fig. 4.** Butt cross-sectional macrostructure. Trial plate no. 4. Steel Alform 700 M. Flux cored wire Böhler Alform 700-MC Ø 1.2 mm. Penetration correct, no imperfections

## Badania właściwości mechanicznych

Badania właściwości mechanicznych materiałów przeznaczonych na konstrukcje spajane, a także złączy spawanych zalicza się do badań niszczących i przeprowadza się je w celu sprawdzenia ich rzeczywistych właściwości.

### Statyczna próba rozciągania

Próba, wykonywana w temperaturze pokojowej, należy do podstawowych prób stosowanych w celu określenia właściwości metali i złączy [3]. Próba przeprowadzona została na maszynie wytrzymałościowej WMP Zwick-Roell ZD-100 zgodnie z zaleceniami PN-EN ISO 4136:2011. Wyniki próby przedstawiono w tablicy III.

Próba wykazała, że wytrzymałość na rozciąganie złączy spawanych jest zbliżona do wytrzymałości badanych materiałów. Złącza spawane charakteryzują się trochę niższą wytrzymałością od materiału rodzimego, jednak spadek ten nie przekracza 5÷10%. Największy spadek wytrzymałości do 10% wykazują złącza spawane drutem litym, w obu rodzajach materiału spawanego. Złącza spawane drutem proszkowym wykazują spadek wytrzymałości na poziomie ok. 5%. Miejscem zerwania próbek w badaniu na rozciąganie był materiał rodzimy tuż na granicy ze strefą wpływu ciepła. Potwierdzają to badania twardości, gdzie na styku tych obszarów występuje największy gwałtowny spadek twardości w kierunku SWC, w której na skutek działania temperatury nastąpił proces rekryształacji i rozrostu ziarna, co mogło spowodować utratę właściwości nabytych w wyniku obróbki termomechanicznej.

**Tablica III.** Wyniki próby rozciągania złączy spawanych metodą MAG blach ze stali Domex 700 MC i Alform 700 M drutem litym Böhler 70 IG Ø1,0 i drutem proszkowym Böhler Alform 700-MC Ø1,2

**Table III.** The results of tensile tests of welded joints MAG steel plate Domex 700 MC and Alform 700 M solid wire Böhler 70 IG Ø1,0 and flux cored wire Böhler Alform 700-MC Ø1.2

Oznaczenie próbki		Przekrój czynny $S_o$ , mm <sup>2</sup>	Siła $R_{p0,2}$ , kN <sup>1)</sup>	$R_{p0,2}$ , MPa <sup>1)</sup>	Siła zrywająca $F_{max}$ , kN	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ , MPa	Wydłużenie $A$ , % <sup>1)</sup>	Miejsce zerwania
Domex 700 MC drut lity	R/1	76,14	53,62	704,23	57,69	757,68	11,0	MR / SWC
	R/2	81,34	55,84	686,50	61,13	751,57	11,4	MR / SWC
Domex 700 MC drut proszkowy	R/3	78,39	55,76	711,32	57,55	734,11	9,2	MR / SWC
	R/4	72,26	51,21	708,69	54,92	760,03	9,6	MR / SWC
Alform 700 M drut lity	R/5	89,51	67,24	751,15	67,88	758,33	7,0	MR / SWC
	R/6	83,28	58,46	714,24	60,57	727,29	6,4	MR / SWC
Alform 700 M drut proszkowy	R/7	74,25	59,35	799,33	59,47	800,89	6	MR / SWC
	R/8	89,70	68,83	767,34	70,89	790,28	7,6	MR / SWC
Domex 700 MC materiał rodzimy				741		816	18	
Alform 700 M materiał rodzimy				817		831	19,6	

<sup>1)</sup> Wg normy PN-EN ISO 4136:2011 określa się tylko wytrzymałość złączy spawanych. Zamieszczone dane o granicy plastyczności i wydłużeniu względnym złączy mają charakter czysto orientacyjny, bowiem nie dotyczą one spoiny lecz złącza spawanego, które nie jest materiałem jednorodnym ani strukturalnie, ani pod względem składu chemicznego.

### Próba zginania

Na złączach doczołowych przeprowadza się próbę w celu sprawdzenia plastyczności złączy oraz wykrycia ewentualnych wad spawania. W czasie zginania włókna zewnętrzne ulegają rozciągnięciu, natomiast wewnętrzne przylegające do trzpienia gnącego są ściskane. Próby wykonuje się zgodnie z PN-EN ISO 1573 [3].

Próbie zginania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej WMP Leipzig ZD-100. Użyto po cztery próbki płaskie poprzeczne typu B pobrane z każdego złącza, po dwie próby od strony lica (FBB) i dwie od strony grani (RBB). W badaniach zamierzony kąt gięcia wynosił 180° dla wszystkich badanych próbek.

Bardzo dobre właściwości plastyczne złączy potwierdziła próba zginania. W wyniku wykonanych prób zginania, zarówno od strony lica, jak i strony grani spoiny, dla każdej próbki uzyskano kąt gięcia 180° bez pęknięć i rys (tabl. IV).

### Pomiary twardości

Badania twardości złączy spawanych mogą służyć ocenie zmian struktury materiału w obrębie spoiny. Pomiary wykonano metodą Vickersa na przekroju

**Tablica IV.** Wyniki próby zginania złączy spawanych metodą MAG blach ze stali Domex 700 MC i Alform 700 M drutem litym Böhler 70 IG Ø1,0 i drutem proszkowym Böhler Alform 700 MC Ø1,2

**Table IV.** The results of bend tests of welded joints MAG steel plate Domex 700 MC and Alform 700 M solid wire Böhler 70 IG Ø1,0 and flux cored wire Böhler alform 700 MC Ø1.2

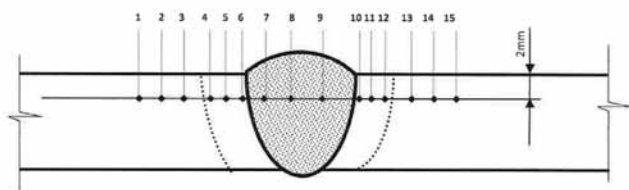
Oznaczenie próbki		Strona gięcia	Kąt gięcia, °	Uwagi
Domex 700 MC drut lity	TFBB	lico	180	bez pęknięć
	TRBB	grań	180	bez pęknięć
	TFBB	lico	180	bez pęknięć
	TRBB	grań	180	bez pęknięć
Domex 700 MC drut proszkowy	TFBB	lico	180	bez pęknięć
	TRBB	grań	180	bez pęknięć
	TFBB	lico	180	bez pęknięć
	TRBB	grań	180	bez pęknięć
Alform 700 M drut lity	TFBB	lico	180	bez pęknięć
	TRBB	grań	180	bez pęknięć
	TFBB	lico	180	bez pęknięć
	TRBB	grań	180	bez pęknięć
Alform 700 M drut proszkowy	TFBB	lico	180	bez pęknięć
	TRBB	grań	180	bez pęknięć
	TFBB	lico	180	bez pęknięć
	TRBB	grań	180	bez pęknięć

poprzecznym złącza, wytrawionego wcześniej zglądu metalograficznego. Wgłębnik obciążono równomiernie siłą 98 N (HV 10). Czas działania obciążenia całkowitego wynosił 10±15 s. Ze względu na małą grubość próbki pomiar wykonano na jednej linii pomiarowej w odległości 2 mm od powierzchni łączonych blach, czyli w osi poprzecznej próbki wg PN-EN ISO 9015-1:2011. Wyniki pomiarów zostały zawarte w tablicy V, a zmianę twardości na przekroju złączy przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

Pomiary twardości złączy spawanych wykazały spadek twardości SWC do wartości ok. 235 HV 10 i spoiny do ok. 255 HV 10 w stosunku do materiału rodzimego (tabl. V, rys. 6 i 7). Różnica ta jest większa dla materiału Domex 700 MC, gdyż większa jest jego twardość (300 HV 10) od twardości materiału Alform 700 M (278 HV 10). W żadnym z obszarów badanych złączy twardość nie przekroczyła wartości dopuszczalnej dla stali o wysokiej granicy plastyczności, która wynosi 420 HV (wg PN-EN 10149-2).

Pomiary te potwierdziły tendencję występującą w stalach wysokowytrzymałych polegającą na spadku twardości w oraz strefach wpływu ciepła złączy. Największą różnicę pomiędzy najwyższą i najniższą twardością zanotowano na granicy materiału rodzimego i strefy wpływu ciepła.

Przeprowadzone badania w celu opracowania technologii spawania umożliwiają wykonanie nowoczesnych platform kolejowych, przy produkcji których wykorzystano opisane wyżej wysokowytrzymałe materiały (rys. 8).



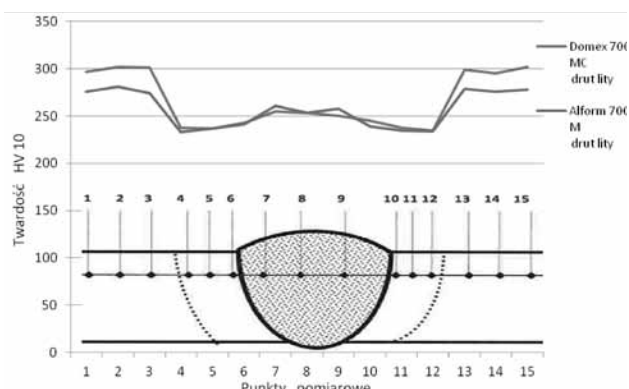
**Rys. 5.** Rozmieszczenie linii pomiarowej i miejsc odcisków z przeprowadzonych pomiarów twardości złączy kontrolnych

**Fig. 5.** Distribution of lines and measurement of hardness tests carried out on control joints

**Tablica V.** Wyniki pomiarów twardości badanych złączy spawanych metodą MAG ze stali Domex 700 MC i Alform 700 M drutem litym Böhler X 70-IG i drutem proszkowym Böhler Alform 700-MC

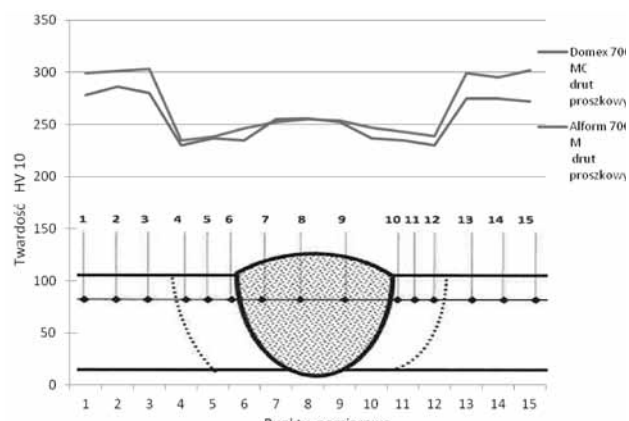
**Table V.** Results of hardness measurements studied on MAG welded joints of steel Domex 700 MC and Alform 700 M solid wire Böhler 70 IG Ø1,0 and flux cored wire Böhler Alform 700-MC

Oznaczenie próbki	Punkty pomiarowe, wg rysunku 5														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Domex 700 MC drut lity	297	302	301	238	237	243	255	253	250	245	238	235	299	295	302
Domex 700 MC drut proszkowy	299	301	303	235	238	246	252	255	254	247	243	239	299	295	302
Alform 700 M drut lity	276	281	274	233	237	241	261	253	258	239	235	234	279	276	278
Alform 700 M drut proszkowy	278	286	280	230	237	235	255	256	252	237	235	230	275	275	272



**Rys. 6.** Rozkład twardości w złączach spawanych metodą MAG ze stali Domex 700 MC i Alform 700 M drutem litym Böhler X 70-IG

**Fig. 6.** Distribution of hardness in the welded joints MAG steel Domex 700 MC and Alform 700 M solid wire Böhler X 70-IG



**Rys. 7.** Rozkład twardości w złączach spawanych metodą MAG ze stali Domex 700 MC i Alform 700 M drutem proszkowym Böhler Alform 700-MC

**Fig. 7.** Distribution of hardness in the welded joints MAG steel Domex 700 MC and Alform 700 M flux cored wire Böhler Alform 700-MC



**Rys. 8.** Platforma Laaers do przewozu samochodów osobowych  
**Fig. 8.** Platform Laaers for the transport of cars

## Podsumowanie

Uzyskane wyniki badań w celu porównania złączy spawanych ze stali wysokowytrzymałej Domex 700 MC i Alform 700 M drutem litym Böhler X 70-IG oraz drutem proszkowym Böhler Alform 700-MC nie wykazały znaczących różnic właściwości wytrzymałościowych pomiędzy badanymi materiałami. Wytrzymałość na rozciąganie badanych złączy była niższa o ok. 5÷10% od wytrzymałości materiału rodzimego. Cechą charakterystyczną badanych złączy jest zmniejszenie twardości w strefie SWC w porównaniu z twardością materiału rodzimego.

Na podstawie wykonanych badań można zauważyć wyraźnie korzystniejszy wpływ na kształt geometryczny spoiny spawania drutem proszkowym niż spawaniem drutem litym. Na brzegu spoin występuje łagodne przejście do powierzchni materiału rodzimego, co ma duże znaczenie z uwagi na to, że stale wysokowytrzymałe charakteryzuje skłonność do pęknięć w wyniku oddziaływania karbu. Zastosowany drut charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami technologicznymi, co ułatwia unikanie powstawania niezgodności spawalniczych takich

jak np. „przyklejenia”, szczególnie groźnych dla tego typu złączy, oraz zapewnia uzyskanie głębokiego równomiernego wtopienia spoiny.

Z obserwacji podczas spawania oraz na podstawie wyników badań i analizy struktury materiałów wysokowytrzymałych Domex 700 MC i Alform 700 M wynika, iż przy opracowywaniu technologii spawania dla większych grubości należy zwrócić szczególną uwagę na naprężenia spawalnicze oraz ilości ciepła wprowadzonego podczas spawania wielościgowego. Wpływ parametrów spawania będzie znaczący szczególnie dla spoin wielościgowych, gdyż oddziałuje bezpośrednio na właściwości wytrzymałościowe złącza. W przypadku spawania blach o grubości do 5 mm w rozpatrywanych złączach wpływ parametrów jest mniejszy, gdyż ograniczono do minimum energię liniową dostarczoną do złącza jednościgowego. Na podstawie badań wytrzymałościowych potwierdzono dobrą plastyczność badanych złączy oraz zaobserwowano niewielki spadek właściwości wytrzymałościowych złączy w stosunku do materiału podstawowego.

## Literatura

- [1] Tasak E.: Metalurgia spawania. Wydawnictwo JAK Kraków 2008.
- [2] Ferenc K.: Spawalnictwo. WNT Warszawa 2007.
- [3] Praca zbiorowa pod redakcją prof. dr. hab. inż. Jana Pilarczyka: Poradnik inżyniera. Spawalnictwo Tom 1. WNT Warszawa 2003.

- [4] Materiały reklamowo-informacyjne SSAB Poland.
- [5] Materiały reklamowo-informacyjne Voestalpine.