

Wybrane właściwości złączy spawanych stali S700 MC wykonanych metodą hybrydową plazma+MAG

Selected properties of plasma+MAG welded joints of S700 MC steel

Streszczenie

Celem niniejszej pracy jest zbadanie wpływu energii liniowej na właściwości złączy spawanych wykonanych metodą hybrydową Plazma+MAG ze stali S700 MC (o wysokiej granicy plastyczności $R_e = 700$ MPa). W ramach badań wykonane zostały spawane złącza próbne blach ze stali obrabianej termomechanicznie dla różnych wartości m.in. energii liniowej spawania. W celu zweryfikowania jakości oraz właściwości otrzymanych złączy, przeprowadzono badania niszczące, pomiary twardości oraz próby właściwości mechanicznych złączy.

Słowa kluczowe: spawanie hybrydowe Plazma+MAG; stal o wysokiej wytrzymałości; S700 MC; stal termomechaniczna; energia liniowa spawania; badania niszczące

Abstract

The purpose of this paper is to investigate the influence of heat input on the properties of welded joints produced by the Plasma+MAG method of S700 MC (high strength $R_e = 700$ MPa). Welded joints of thermomechanical steel have been made with different values of heat input. Due to the verification of the quality and properties of the obtained joints, destructive tests, hardness measurements and mechanical properties of joints were performed.

Keywords: Plasma+MAG hybrid welding; high strength steel; thermomechanical steel; heat input; destructive testing

Wstęp

Do budowy konstrukcji spawanych coraz częściej stosowane są nowoczesne materiały konstrukcyjne o podwyższonej wytrzymałości, które łączy się również nowymi wysokowydajnymi hybrydowymi metodami spawania. W pracy została wykorzystana nowoczesna metoda hybrydowego spawania Plazma+MAG (scharakteryzowana w pracach [6,7,9]) charakteryzująca się wysoką koncentracją ciepła w miejscu łączonych elementów, dzięki czemu możliwe jest wykonanie pełnowartościowych złączy o stosunkowo niedużej szerokości spoiny i dużej wysokości. W celu zbadania wpływu wartości energii liniowej na własności mechaniczne złączy doczołowych (stali S700 MC) zostały one poddane badaniom niszczącym. Praca przedstawia wyniki oraz analizę przeprowadzonych badań metalograficznych (makro- i mikroskopowych), pomiarów twardości oraz badań właściwości mechanicznych tj. statycznej próby rozciągania i zginania oraz próby udarowości.

Stal obrabiana termomechanicznie o wysokiej granicy plastyczności

Obróbka cieplno-plastyczna jest najbardziej efektywnym sposobem poprawy właściwości mechanicznych, ponieważ uzyskuje się jednocześnie zwiększenie granicy plastyczności, polepszenie ciągliwości i spawalności przy równoczesnym stosowaniu w stali relatywnie małej ilości dodatków stopowych. Najkorzystniejszymi mechanizmami umocnienia stali wysokowytrzymałych są rozdrobnienie ziarna, utwardzenie wydzieleniowe i utwardzenie dyslokacyjne [1-4]. W celu obniżenia kosztów produkcji tego rodzaju stali przy zachowaniu ich wysokich właściwości wytrzymałościowych bez znacznego pogorszenia spawalności, zaczęto wytwarzać stale konstrukcyjne z mikrododatkami oraz stosować procesy dodatkowo zwiększające wytrzymałość. Przykładem tak otrzymywanych materiałów są stale walcowane termomechanicznie. Rozpiętość granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie produkowanych obecnie stali

Mgr inż. Beata Skowrońska; dr hab. inż. Tomasz Chmielewski, prof. PW; dr hab. inż. Dariusz Golański, prof. PW – Politechnika Warszawska; mgr inż. Jacek Szulc – SupraElco.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: be.skowronska@gmail.com

o podwyższonej wytrzymałości jest bardzo duża. Znane są już stale o $R_e = 1850$ MPa. Zastosowanie stali o wysokiej granicy plastyczności umożliwia zarówno zmniejszenie masy konstrukcji jak i zużycia stali. Elementy konstrukcji wykonane ze stali o podwyższonej wytrzymałości w stosunku do elementów ze zwykłej stali konstrukcyjnej mogą przenosić te same obciążenia przy mniejszych przekrojach.

Ogólnie przy spawaniu stali drobnoziarnistych wysokowytrzymałych należy zwrócić uwagę na stosowanie właściwych materiałów dodatkowych do spawania, zawierających składniki stopowe, które zapewniają odpowiedni poziom właściwości wytrzymałościowych spoiny w stosunku do materiału rodzimego. Warunki stygnięcia oraz wartość energii liniowej procesu spawania mają również znaczący wpływ na strukturę SWC oraz spoiny. Przy dużych prędkościach chłodzenia typową strukturą SWC stali obrabianych termomechanicznie jest bainit dolny, wykazujący zadowalającą odporność na pękanie kruche. Jednak wprowadzenie dużej ilości ciepła do złącza spawanego wydłuża czas wytrzymania SWC w wysokiej temperaturze i obniża prędkość chłodzenia. Prowadzi to do rozrostu ziarna austenitu i w konsekwencji powstania, szczególnie w strefie przyległej do linii wtopienia struktury o gorszych właściwościach plastycznych tj. wąskopłytowych granic między listwami górnego i dolnego bainitu oraz faz martenzytyczno-austenitycznych.

Cykl cieplny spawania stali obrabianych termomechanicznie, może wywołać następujące problemy:

- pęknięcia gorące krystalizacyjne i segregacyjne;
- pęknięcia zimne wodorowe w SWC i w spoinie;
- pękanie lamelarne;
- pękanie korozyjne w kwaśnych gazach;
- zmiękczenie SWC w wyniku spawania (problem „warstwy miękkiej”);
- nieosiągnięcie wymaganego poziomu udarność w spoinie i w SWC (kruchłość spowodowana utwardzeniem wydzieleniowym, niekorzystna struktura).

Podczas spawania stali obrabianych termomechanicznie w strefie wpływu ciepła powstaje obszar o zmiekczonej mikrostrukturze, który ma gorsze właściwości wytrzymałościowe. Osłabienie to jest jeszcze wyraźniej widoczne, gdy po procesie kontrolowanego walcowania stosowano przyspieszone chłodzenie lub walcowanie odbywało się w zakresie temperatury Ac_3-Ac_1 (wówczas uzyskana mikrostruktura mogła powstać częściowo przez umocnienie zgniotem). Spawanie z ograniczoną mocą liniową łuku sprawia, że „warstwa miękka” jest wąska.

Stal S700 MC charakteryzuje się silnie zdefektowaną, nierównowagową strukturą bainityczno-ferrytyczną, która jest utwardzona wydzieleniowo, roztworowo oraz przez zgniot i rozdrobnienie ziarna. W wyniku spawania dochodzi do zmian dyspersji i rozpadu faz umacniających, które w trakcie stygnięcia wydzielają się ponownie w obszarze SWC i spoiny, lecz w sposób niekontrolowany. W obszarze strefy wpływu ciepła zachodzą również procesy starzeniowe.

Podstawowe problemy, jakie pojawiają się podczas procesu spawania stali obrabianych termomechanicznie to:

- utrata właściwości nabytych w trakcie obróbki cieplno-plastycznej w wyniku oddziaływania cyklu cieplnego spawania, który może powodować częściowe rozpuszczenie drobnodispersyjnych wydzielań umacniających (węgliki, węglikoazotki Nb, Ti, V) i ich ponowne niekontrolowane wydzielenie;
- nadmierny rozrost wydzielań umacniających i utrata ich zdolności hamowania rozrostu ziarna;
- przechodzenie mikrododatków stopowych podczas spawania do spoiny oraz różnica w równowazniku węgla pomiędzy materiałem rodzimym a spoiną.

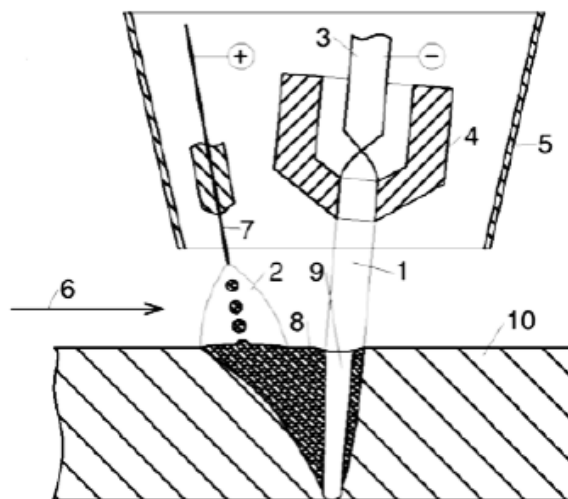
Odpowiednie sterowanie procesem spawania może ograniczyć skalę ich wystąpienia.

Charakterystyka spawania hybrydowego Plazma+MAG

Połączenie spawania plazmowego i MAG pozornie nie spełnia „warunku hybrydy” o stosowaniu dwóch różnych pod względem źródła ciepła metod spawania, ponieważ obydwie źródła ciepła bazują na łuku elektrycznym. Jednak te dwa podobne źródła energii spawania, w różny sposób przekazują ciepło do materiału spawanego. Sposób nagrzewania materiału rodzimego w metodzie MAG ma charakter przewodnościowy, a w przypadku łuku plazmowego w wysokim stopniu zjonizowanego o wysokiej temperaturze i gęstości mocy umożliwiającej powstanie kanału parowego, ciepło przekazywane jest do materiału spawanego w głównej mierze poprzez bombardowanie elektronami anody (ale mechanizm przewodnościowy również funkcjonuje). W przypadku łuku plazmowego przekazanie ciepła do materiału rodzimego ma charakter gwałtowny i następuje w wyniku pochłaniania energii strumienia elektronów na skutek zderzeń elektronów z siecią krystaliczną materiału. Poziom energii kinetycznej elektronów zamienianej w energię cieplną na skutek zderzenia, zależy od stopnia jonizacji i wartości napięcia przyspieszającego.

Niskotemperaturowa plazma stosowana jest często w napawaniu modyfikacyjnym i regeneracyjnym powierzchni części maszyn. W technice z otwartym kanałem parowym wykorzystywana jest także do spawania grubych elementów konstrukcyjnych [7,9]. Cechą charakterystyczną tej techniki jest (przy odpowiednio dobranej synchronizacji czasu narastania natężenia prądu spawania i natężenia przepływu gazu plazmowego) rozwijające się zagłębienie tzw. kanału parowego (kapilary). Utworzenie kanału parowego jest możliwe, gdy moc jednostkowa łuku plazmowego wynosi powyżej 10^{10} W/m². Głębokość kapilary odpowiada pełnej penetracji materiału i część łuku plazmowego jest widoczna od strony grani. W procesie spawania plazmowego taką techniką, ciepło przekazywane jest do materiału spawanego na całej długości kapilary (a nie od powierzchni jak to ma miejsce w przypadku spawania techniką z jeziorkiem) [5].

Schemat budowy plazmotronu hybrydowego został przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat budowy plazmotronu hybrydowego: 1 – łuk plazmowy, 2 – łuk GMA, 3 – katoda plazmotronu, 4 – dysza plazmowa, 5 – wspólna dysza gazu osłonowego, 6 – kierunek spawania, 7 – drut elektrodowy GMA, 8 – ciekły metaliczny, 9 – kanał parowy, 10 – materiał podstawowy [6]

Fig. 1. Schematic diagram of the hybrid plasmatron: 1 – plasma arc, 2 – GMA arc, 3 – plasmatron cathode, 4 – plasma nozzle, 5 – common shielding gas nozzle, 6 – welding direction, 7 – GMA wire electrode, 8 – liquid metal, 9 – plasma keyhole, 10 – substrate material [6]

Mała ilość ciecicy metalicznej powstającej za przemieszczającym się łukiem plazmowym, będącą efektem intensywnego parowania metalu oraz minimalnego, ale jednak odstępu brzegów spawanych elementów, powodowałyby wklęsłe lico. Problem ten został wyeliminowany poprzez zastosowanie swobodnie jarzącego się w przestrzeni między elektrodami łuku GMA. Łuk GMA oddziałuje na jeziorko spawalnicze tuż za łukiem plazmowym, jeszcze przed skryształizowaniem ciecicy powstałej na skutek działania plazmy, a masa topionego spoiwa służy do formowania lica spoiny. Poprzez materiał dodatkowy, można również wpływać na skład chemiczny [6-10].

W związku z wykorzystaniem jednocześnie dwóch, oddzielnych źródeł ciepła Q_1 – ciepło dostarczane z łuku plazmowego oraz Q_2 – ciepło dostarczane z łuku elektrycznego MAG, w celu wyznaczenia energii liniowej spawania hybrydy, zaproponowano zależność (1) uwzględniającą różne wartości współczynnika sprawności cieplnej: dla Plazmy $\eta=0,6$; dla MAG $\eta=0,8$

$$E_{hyb}=(0,6 \cdot U_p \cdot I_p + 0,8 \cdot U_m \cdot I_m) / V_s \quad [J/mm] \quad (1)$$

gdzie:

E_{hyb} – energia liniowa hybrydy Plazma+MAG;

U_p, U_m – odpowiednio napięcie łuku plazmowego i łuku elektrycznego MAG [V];

I_p, I_m – odpowiednio natężenie łuku plazmowego i łuku elektrycznego MAG [A];

V_s – prędkość spawania [mm/s].

Warunki spawania

Złącza spawane, zostały wykonane na zrobotyzowanym stanowisku, powstałym w ramach projektu Inicjatywy EUREKA, przy współpracy firm SUPRA ELCO Jacek Szulc, Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów „PIAP” w Warszawie oraz Zakładu Inżynierii Spajania Politechniki Warszawskiej. Spawane płyty próbne zostały wykonane z blach o wymiarach 350 x 150 x 10 mm. Uzyskano spoiny doczołowe w pozycji podłonej (PA), jednym ściegiem. Do uformowania grani zastosowana została miedziana podkładka z oddzielnym chłodzeniem. Dane dotyczące właściwości mechanicznych stali S700 MC (zgodnie z PN-EN 10149-2) przedstawione zostały w tablicy I.

Ze względu na grubość spawanych blach $g = 10$ mm, przygotowanie złącza polegało na ukosowaniu krawędzi na Y z progiem 6 mm i pod kątem 15° z zachowaniem odstępu $b = 1,2$ mm. Zgodnie z zaleceniami producenta SSAB stal Domex 700MC E może być spawana przy użyciu wszystkich dostępnych metod spawania (bez konieczności podgrzewania wstępnego). W celu uzyskania najwyższych wymagań wytrzymałościowych złączy wykonanych z tej stali, należy stosować materiały dodatkowe o wyższej wytrzymałości niż materiał podstawowy [10]. Zastosowano drut elektrodowy G 69 6 M21 Mn4Ni1 (nazwa handlowa ED-FK 800) o średnicy 1,2 mm. Materiał ten jest dedykowany do spawania stali

Tablica I. Właściwości mechaniczne stali walcowanej termomechanicznie S700 MC wg PN-EN 10149-2

Table I. Mechanical properties of S700 MC steel according with EN 10149-2

Właściwości mechaniczne			
Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	Granica plastyczności R_e [MPa]	Wydłużenie A_5 [%]	Udarność [J/cm ²] (-20 °C)
822	768	19	135

niskostopowych o wysokiej wytrzymałości, a wytypowany został ze względu na jego wysoką wartość granicy plastyczności (porównywalną z granicą plastyczności materiału spawanego). Poniższe tablice zawierają dane dotyczące składu chemicznego materiału dodatkowego (tabl. II) oraz jego właściwości mechanicznych (tabl. III).

Tablica II. Skład chemiczny materiału dodatkowego ED-FK-800

Table II. Chemical composition of filler material ED-FK-800

Skład chemiczny ED-FK 800 [%]						
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti
0,09	0,55	1,67	0,25	1,52	0,50	0,07

Tablica III. Właściwości mechaniczne materiału dodatkowego ED-FK-800

Table III. Mechanical properties of filler material ED-FK-800

Właściwości mechaniczne spoiny z drutu elektrodowego ED-FK 800			
Granica plastyczności [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Wydłużenie [%]	Udarność z karbem V wg Charpy'ego [J]
≥ 690	≥ 770	4d/5d: ≥ 17	RT ≥ 100 -60 °C ≥ 47

W zastosowanej hybrydowej metodzie spawania możliwości doboru parametrów nie są tak szerokie jak w przypadku metod konwencjonalnych. Jedynie w wąskim obszarze dostępnych parametrów otrzymują się synergiczne źródła ciepła obydwu metod użytych w hybrydzie. W związku z tym, zbyt duże zmiany jednego z parametrów spawania (np. natężenia prądu spawania) mogą – spowodować złą jakość spoiny.

Wykonano szereg prób poświęconych doborowi parametrów. W pierwszym etapie opracowano warunki umożliwiające uzyskanie właściwej geometrii spoin czołowych, wymagające synergicznego współdziałania obydwu metod w hybrydzie. W kolejnym etapie doboru parametrów opracowano warunki spawania z różną wartością energii liniowej (tabl. IV). Ze względu na wysoki stopień skomplikowania sterowania procesem hybrydowym, możliwe było spawanie jedynie z dwiema różnymi wartościami energii liniowej spawania. Do badań właściwości mechanicznych złączy wytypowano zestawy parametrów C2 i C4. Podczas prób spawania stosowano następujące gazy, plazmatwórczy – o handlowej nazwie Argon 4,5 (99,995%) – gaz z grupy I1 wg PN-EN ISO 14175 oraz osłonowy – mieszanka osłonowa M21 (CORGON 18) zawierająca 20% CO₂ i 80% Ar.

Badania metalograficzne

W celu określenia właściwości złączy spawanych przeprowadzone zostały badania metalograficzne: makro- i mikroskopowe oraz badania właściwości mechanicznych tj.:

- statyczna próba rozciągania złącza spawanego doczołowego wg PN-EN 10002-1:2004,
- próba technologiczna zginania złączy doczołowych wg PN-EN ISO 5173:2010,
- próba udarności spawanych złączy metalowych wg PN-EN 10045-1:1994,
- próba twardości metalowych złączy spawanych wg PN-EN ISO 6507-1:2007.

Tablica IV. Parametry spawania złączy próbnych
Table IV. Welding parameters of testing joints

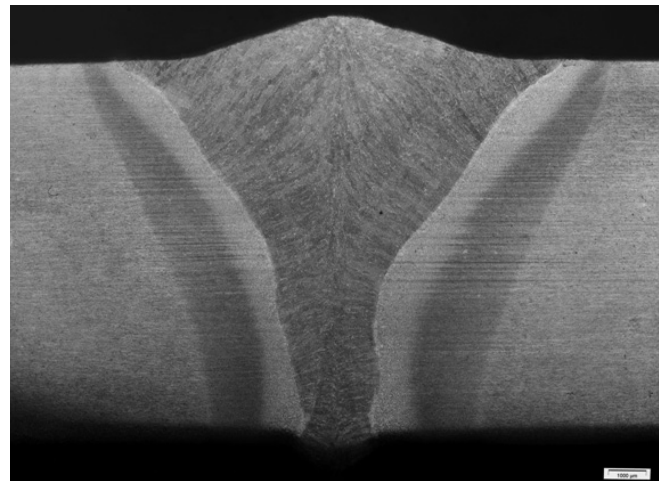
Oznaczenie złącza	Napięcie łuku plazmowego [V]	Natężenie prądu łuku plazmowego [A]	Napięcie łuku MAG [V]	Natężenie prądu łuku MAG [A]	Prędkość spawania [m/min]	Energia liniowa spawania [kJ/mm]
C1	30	350	26,3	272	0,55	1,311
C2	23,4	335,4	31,8	360,6	0,75	1,11
C4	23,9	332,4	33,6	390,7	0,95	0,96
C5	30	350	29,3	369	1	0,897

gdzie, przyjęty współczynnik sprawności nagrzewania łukiem dla: plazmy $\eta=0,6$; MAG $\eta=0,8$

Przygotowanie zgładów obejmowało klasyczne procedury szlifowania i polerowania, z końcowym trawieniem Nitalem 5%. Obserwacje makroskopowe przeprowadzono na mikroskopie świetlnym Olympus. Obserwacje pod mikroskopem nie wykazały niezgodności spawalniczych. Zaobserwowano natomiast „wyjątkowość” obszaru strefy wpływu ciepła (SWC) polegającą na wystąpieniu podwójnej (dwupasmowej) strefy wpływu ciepła (rys. 2).

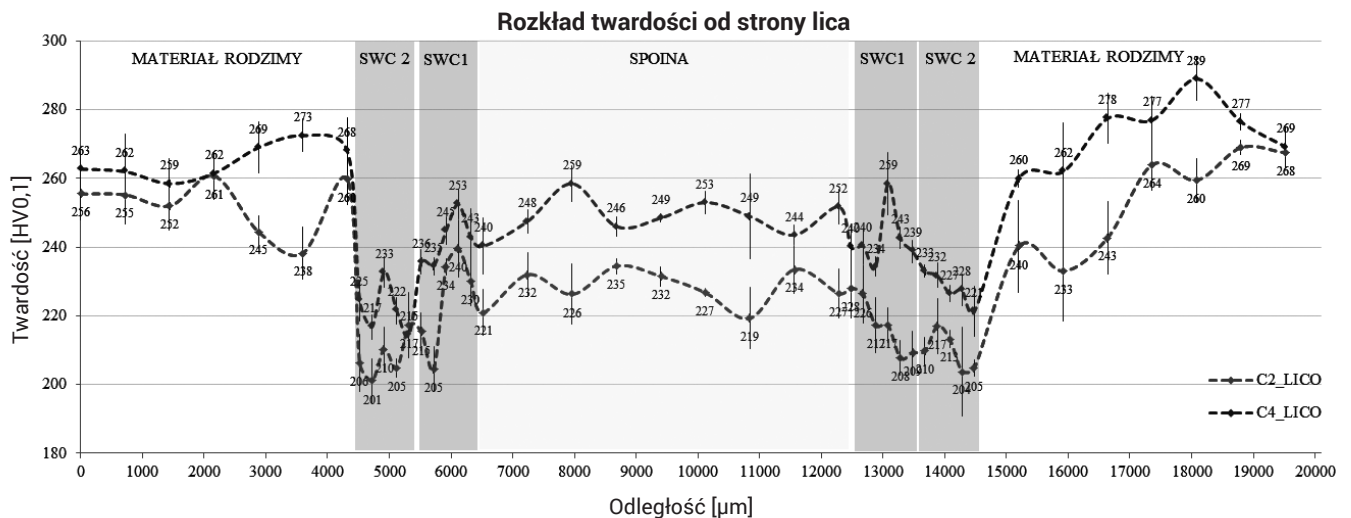
Badania mikrostruktury złączy wykazały, że zaobserwowana podczas badań makroskopowych podwójna strefa wpływu ciepła SWC1 i SWC2, charakteryzuje się różną wielkością ziaren, tablica V.

Struktura materiału rodzimego charakteryzuje się pasmowym ułożeniem ziaren z widocznymi odkształceniami plastycznymi będącymi efektem procesu kontrolowanego walcowania (wywołującego zgniot) z przyspieszonym chłodzeniem. Efekt ten, ze względu na wysoką temperaturę procesu spawania został utracony w SWC2 – jest to obszar o strukturze drobnoziarnistej, natomiast w SWC1 – w obszarze wysokotemperaturowym wystąpił znaczny rozrost ziaren. Podczas badań mikroskopowych zaobserwowano również wydzielania o wielkości od kilku do kilkunastu μm . Wg autora [1] jeśli wydzielania mają ostre kształty, to są to węglikoazotki Ti, a wydzielania z czarnym punktem w środku, prawdopodobnie wykryły się na zanieczyszczeniach stali (nie blokują one granic ziaren).



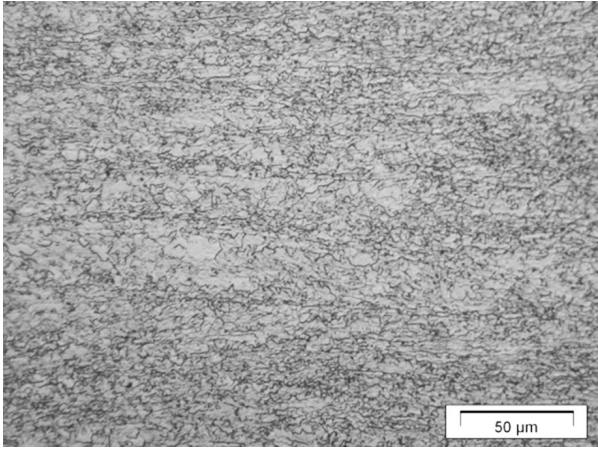
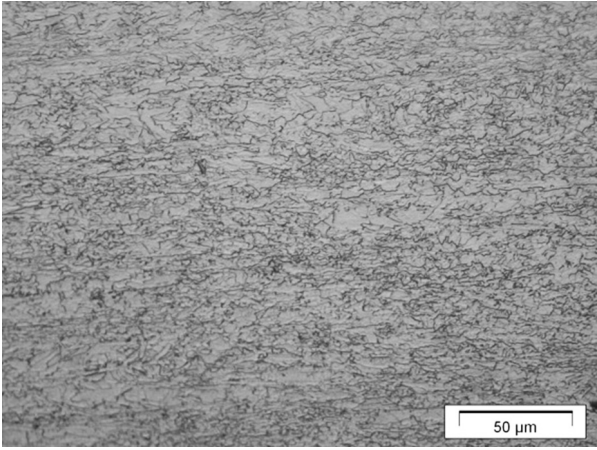
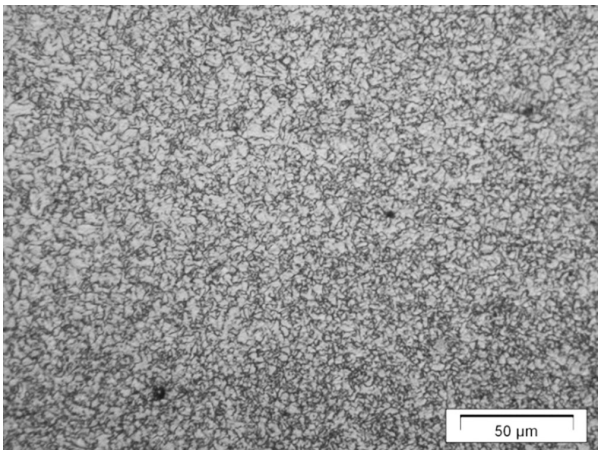
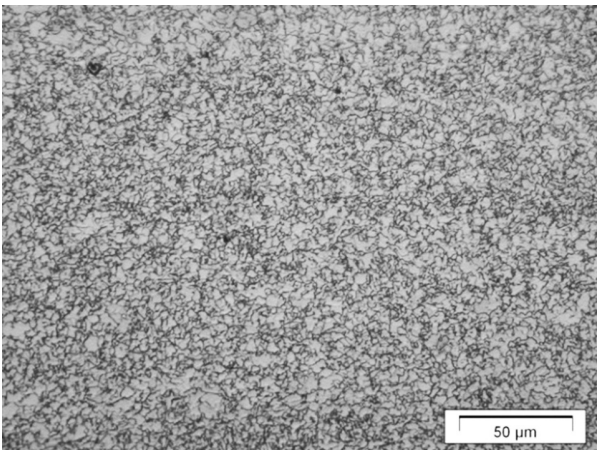
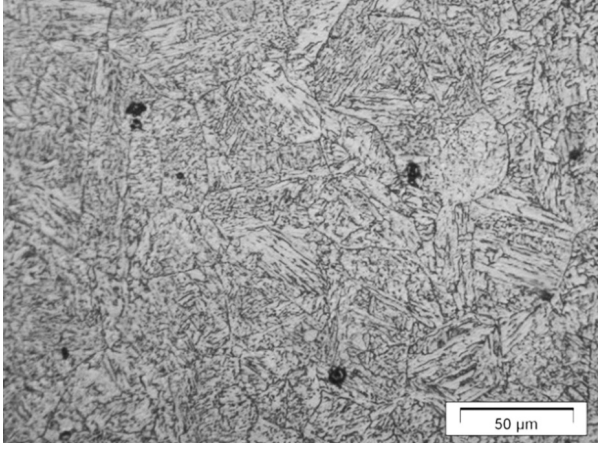
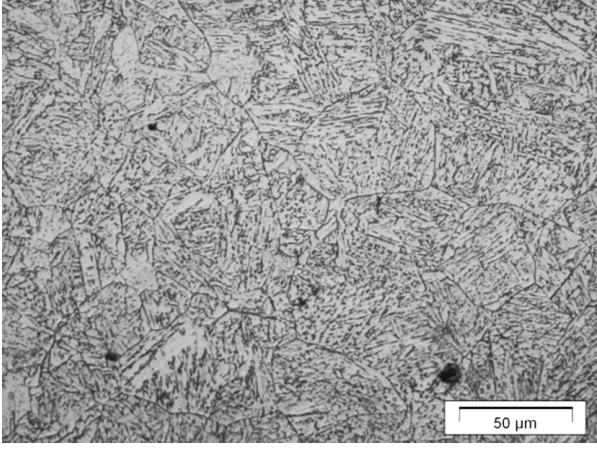
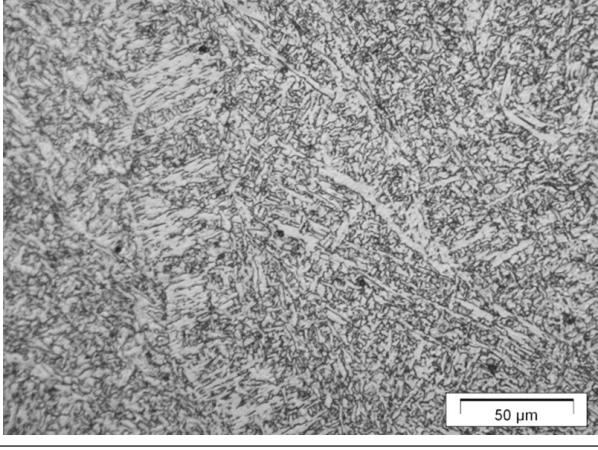
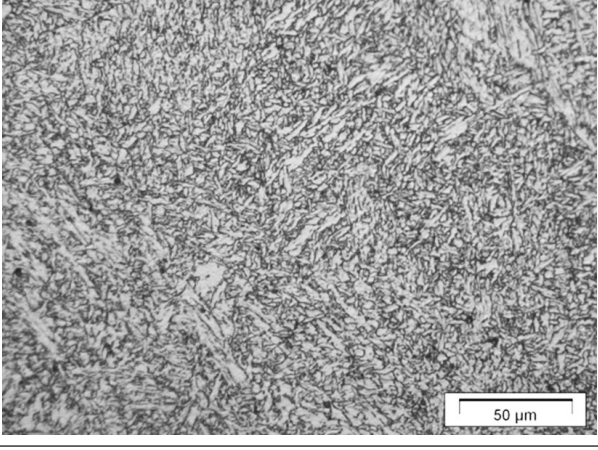
Rys. 2. Makrostruktura złącza C2
Fig. 2. Macrostructure of C2 welded joint

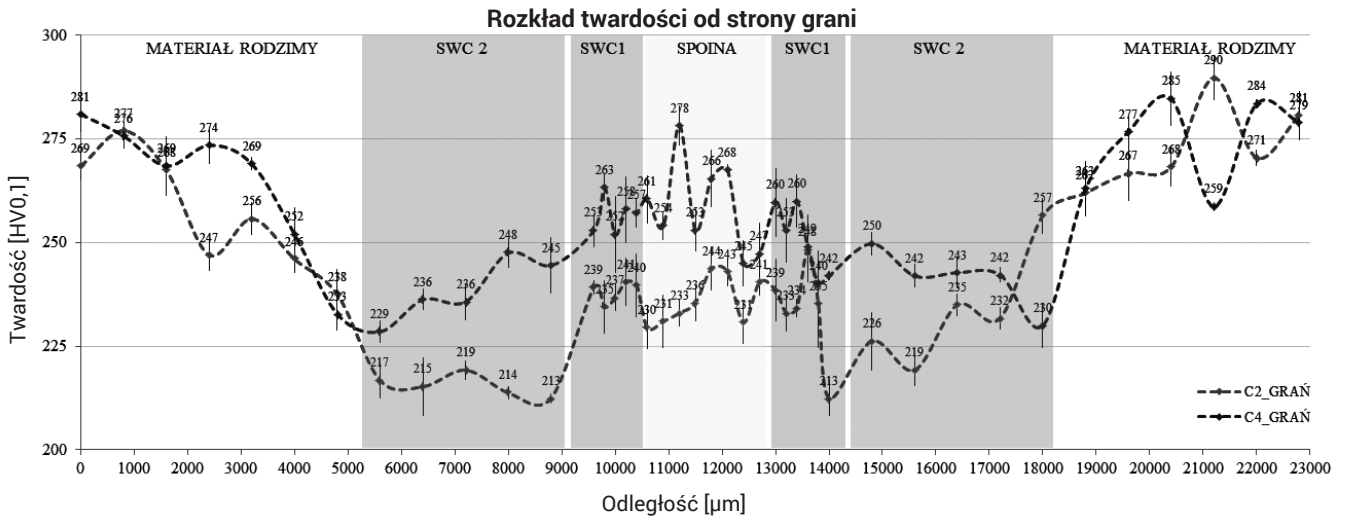
Pomiary twardości metodą Vickersa, z obciążeniem węgelnika masą 100 g, zostały wykonane na twardościomierzu EITZ MINILOAD 8375. Na wykresach (rys. 3÷5) przedstawione zostały wartości średnie (każdego z punktów pomiarowych) oraz ich odchylenia standardowe z przyjętym 95% poziomem ufności.



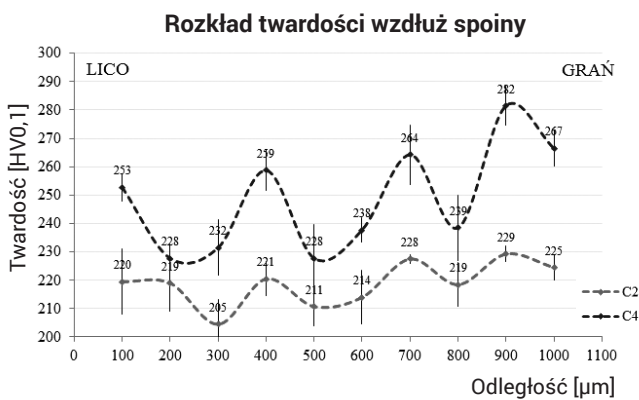
Rys. 3. Rozkład twardości w spoinie od strony lica
Fig. 3. Hardness distribution in welded joint (face side)

Tablica V. Mikrostruktura złączy spawanych hybrydowo Plazma+MAG, powiększenie x500
Table V. Microstructure of Plasma+MAG welded joints, zoom x500

	C2	C4
MATERIAŁ RODZIMY		
SWC2		
SWC1		
SPOINA		



Rys. 4. Rozkład twardości w spoinie od strony grani
Fig. 4. Hardness distribution in welded joint (root side)



Rys. 5. Rozkład twardości w kierunku wysokości spoiny
Fig. 5. Hardness distribution in the height direction of the weld joint

Analizując przedstawione wykresy można zauważyć następujące zależności:

- porównanie rozkładów twardości C2 i C4, zarówno od strony lica jak i grani wykazało, że wyższą twardość (w każdym charakterystycznym obszarze złączy) wykazuje połączenie wykonane z niższą energią liniową spawania – złącze C4;
- zaobserwowano znaczące obniżenie twardości w strefie wpływu ciepła;
- obszarem charakteryzującym się największym zmiękczeniem jest SWC2;
- spadek średniej twardości (w stosunku do materiału rodzimego) zanotowano również w spoinie: w C2 o ok. 25 HV0,1, w C4 o ok. 15 HV0,1.

Badania właściwości mechanicznych złączy

W celu sprawdzenia wytrzymałości na rozciąganie badanych złączy została przeprowadzona statyczna próba rozciągania. Próbkę została pobrana poprzecznie i ukształtowana w „wioselka”, o przekroju (na długości roboczej) 14 x 10 mm. Dla poprawnego określenia miejsca zerwania, boki próbek wytrawiono Nitałem 30%. Przyjęta prędkość rozciągania wynosiła 5 mm/min. Przeprowadzone próby nie wykazały wpływu wartości energii liniowej na wytrzymałość złączy na rozciąganie, ponieważ dla wszystkich próbek doraźna wytrzymałość na rozciąganie wyniosła ok. 770 MPa (przy R_m materiału

spawanego na poziomie 822 MPa). Pomimo zastosowania materiału dodatkowego o wysokich właściwościach mechanicznych, wytrzymałość na rozciąganie złączy była na poziomie najniższej wartości R_m (określonej przez producenta) materiału dodatkowego.

Podczas spawania metodą hybrydową Plazma+MAG, udział materiału rodzimego w spoinie jest na poziomie przekraczającym 50% – a więc, mogło dojść do znacznego zubożenia składu chemicznego spoiny. Poprawę jej wytrzymałości na rozciąganie można uzyskać np. poprzez dobór innego materiału dodatkowego.

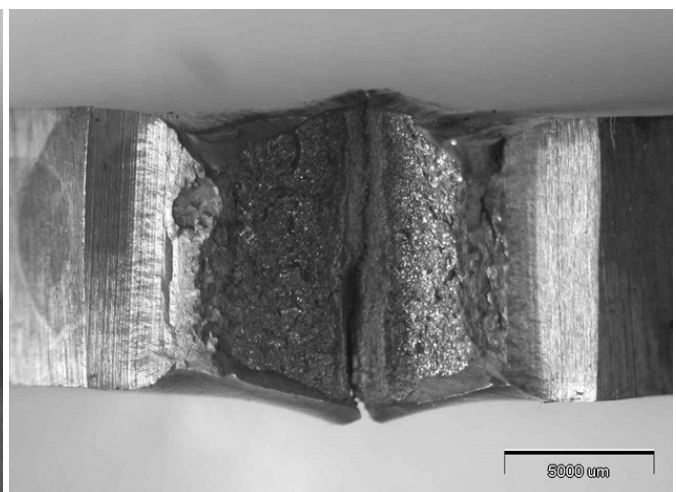
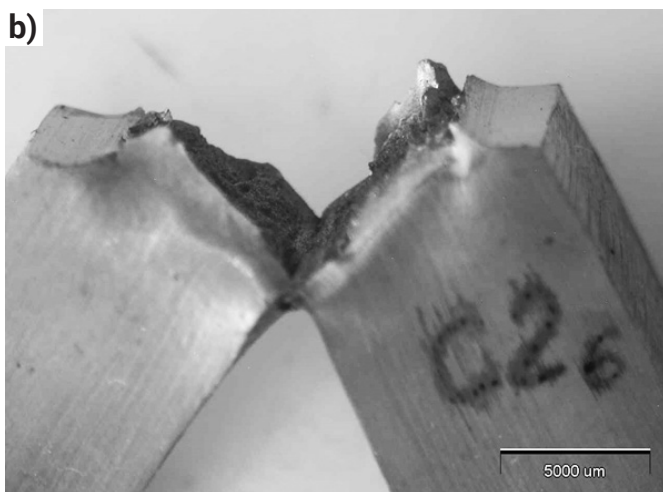
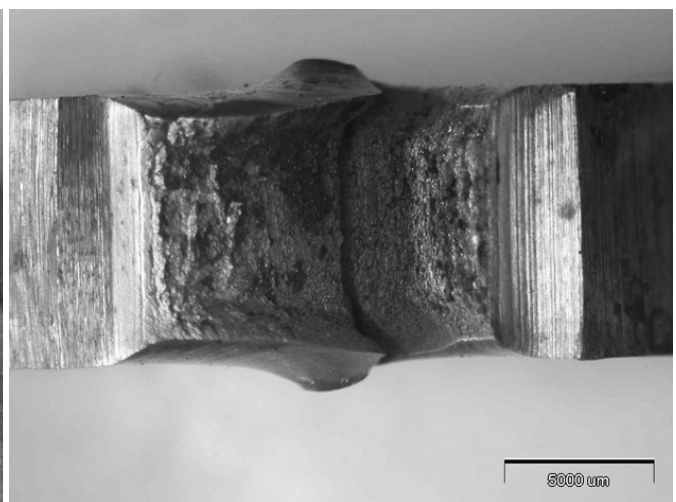
Badane złącza zostały poddane próbie zginania poprzecznego z rozciąganiem od strony lica oraz od strony grani. Próby wykonano na stanowisku badawczym o max. obciążeniu 50 kN z zastosowaniem trzpienia o średnicy 30 mm i odległością między rolkami równą 60 mm. Zgodnie z zaleceniami PN-EN ISO 5173:2010 szerokość próbek wynosiła 40 mm. W celu uniknięcia karbów koncentrujących naprężenia, lico oraz grani zostały zeszlifowane. Następnie dla określenia położenia osi spoiny oraz lica i grani boki próbek zostały wytrawione Nitałem 30%. Na próbkach zginanych od strony lica nie zaobserwowano żadnych nieprawidłowości (rys. 6a), natomiast podczas zginania od strony grani na powierzchni obserwowano uskoki na liniach wtopienia (rys. 6b).

Próba udarności

W celu określenia wytrzymałości złączy na obciążenia dynamiczne, zostały przeprowadzone próby udarności. Wykonano je na młocie udarowym VEB Werkstoffprüfmachinen Leipzig. Stosowano energię początkową wahadła 300 J. Próbkę do badań przygotowano zgodnie z PN-EN 10045-1:1994 – pobrane zostały poprzecznie, a ich boki zeszlifowano oraz wytrawiono Nitałem 30%. Na powierzchni od strony lica, został nacięty karb typu V – odpowiednio w SWC lub w spoinie. Następnie próbki zostały skrócone na wymiar 55 mm (tak aby nacięty karb znajdował się w osi symetrii próbek). Próby udarności zostały przeprowadzone w warunkach takich jak w pracy [1], której wyniki traktowano jako odniesienie. W tabelicy VI zestawiono wyniki pomiarów pracy łamania K (w temp. -30 °C) przedstawiając średnią arytmetyczną z czterech pomiarów, odchylenie standardowe od wartości średniej oraz obliczono udarność. Przełomy próbek zbadano również pod mikroskopem świetlnym Olympus. Zdjęcia przełomów przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 6. Widok spoin po próbie gięcia: a) lico spoiny, b) grań spoiny
Fig. 6. View of joint after bending test: a) face side, b) root side



Rys. 7. Widok próbek po teście udarności: a) SWC, b) spoina
Fig. 7. View of samples after impact test: a) HAZ, b) joint

Na podstawie zdjęć przełomów próbek można stwierdzić, że przełomy próbek z karbem naciętym w SWC są mieszane z rozwarstwieniem, natomiast te z karbem w spoinie są rodzaju kruchego. Przełamane próbki charakteryzują się drobnoziarnistą mikrostrukturą.

Uzyskane wartości KCV są nadzwyczaj wysokie.

Analiza wyników wykazała, że:

- w badanych złączach stwierdzono wyższą udarność w SWC niż w spoinie, co stanowi przeciwieństwo do właściwości złączy spawanych metodami konwencjonalnymi, opisane w literaturze;
- wyższą udarność wykazuje złącze wykonane wyższą energią liniową spawania, zawierające mniejszy udział materiału rodzimego w spoinie – złącze C2.

Tablica VI. Wyniki próby udarności w temperaturze -30 °C
Table VI. Results after impact test in temperature -30 °C

Złącze	Obszar złącza	Praca łamania \bar{K} [J]	Odchylenie standardowe s	Udarność KCV (-30 °C) [J/cm ²]*
C2	SWC	162	28,8	203
C2	SPOINA	93	15,97	117
C4	SWC	135	30,59	169
C4	SPOINA	79	11,1	99

* pole powierzchni próbki (w miejscu karbu) $S_0=0,80 \text{ mm}^2$

Podsumowanie i wnioski

Celem pracy było zbadanie wpływu wartości energii liniowej spawania na jakość złączy doczołowych stali S700 MC wykonanych metodą spawania hybrydowego Plazma+MAG. W celu zweryfikowania wpływu parametru na jakość oraz właściwości mechaniczne złączy C2 i C4, przeprowadzono badania niszczące. Zgodnie z normami spreparowano próbki, które zostały poddane badaniom metalograficznym: makro- i mikroskopowym oraz próbom twardości, statycznego rozciągania, zginania i udarności. Analiza wyników przeprowadzonych badań umożliwia sformułowanie następujących wniosków:

1. Możliwe jest wykonanie pełnowartościowego złącza spawanego metodą hybrydową Plazma+MAG stali S700 MC jednościęgowo.
2. Zaobserwowano „podwójną” strefę wpływu ciepła (różniącą się mikrostrukturą i twardością) SWC1 i SWC2.
3. W strefie wpływu ciepła zarejestrowano spadek średniej twardości w złączu spawanym.
4. Niezależnie od wartości energii liniowej spawania, w SWC1 odnotowano mniejszy niż w SWC2 spadek twardości.
5. W złączach spawanych wykonanych z wyższą wartością energii liniowej spawania (C2) zarejestrowano niższą średnią twardość w SWC2 (209 HV0,1), niż w złączach wykonanych niższą wartością energii liniowej spawania (C4), dla której średnia twardość w SWC2 wyniosła 225 HV0,1.
6. Spadek średniej twardości w złączu, zależy jest od wartości energii liniowej spawania – złącze wykonane z niższą wartością energii liniowej charakteryzowało mniejszym spadkiem twardości.
7. Próby statycznego rozciągania oraz zginania wykazały, że występowanie w złączu obszaru zmiękzonego nie decyduje o zmniejszeniu jego właściwości wytrzymałościowych.
8. Udarność KCV złącza zależy od wartości energii liniowej spawania. W przypadku zastosowanej metody hybrydowej Plazma+MAG wyższą udarnością charakteryzuje się złącze wykonane wyższą energią liniową spawania (C2).
9. Niezależnie od wartości energii liniowej (w próbach przeprowadzonych w ujemnej temperaturze) w badanych złączach stwierdzono wyższą udarność w SWC niż w spoinie, co stanowi przeciwieństwo do właściwości złączy spawanych metodami konwencjonalnymi (np. TIG, MAG, SAW, MMA).
10. Udarność w SWC jest nadzwyczaj wysoka. Może to być efektem podwójnego cyklu cieplnego i dwustrefowego obszaru SWC – wymaga to dalszego wyjaśnienia poprzez kolejne badania naukowe.

Literatura

- [1] Górka J.: Właściwości i struktura złączy spawanych stali obrabianej termomechanicznie o wysokiej granicy plastyczności, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
- [2] Górka J.: Właściwości spoin stali obrabianych termomechanicznie o wysokiej granicy plastyczności, Przegląd Spawalnictwa Vol. 83, Nr 12, s. 31-35, 2011.
- [3] Górka J.: Stal obrabiana termomechanicznie S700 MC i jej spawalność, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 6/2012.
- [4] Tasak E., Ziewiec A.: Spawalność materiałów konstrukcyjnych. Tom 1 Spawalność stali, Wydawnictwo JAK, Kraków 2009.
- [5] red. J. Pilarczyk: Poradnik inżyniera, Spawalnictwo t.1, WNT, Warszawa 2013.
- [6] Szulc J., Chmielewski T., Pilat Z.: Zrobotyzowane spawanie hybrydowe Plazma + MAG stali S700 MC, Przegląd Spawalnictwa Vol. 88, Nr 1, s. 41-45, 2016.
- [7] Szulc J., Chmielewski T., Węglowski M.: Wybrane możliwości technologiczne hybrydowej metody spawania Plasma-MAG, Przegląd Spawalnictwa Vol. 88, Nr 5, 2016, s. 89-92.
- [8] Górka J., Stano S.: Właściwości i struktura złączy spawanych hybrydowo HLAW (wiązka laserowa – FCAW) stali obrabianej termomechanicznie S700 MC, Przegląd Spawalnictwa Vol. 87, Nr 5, 2015, s. 52-56.
- [9] Chmielewski T., Szulc J., Pilat Z.: Badania metalograficzne spoin wykonanych hybrydową metodą PTA-MAG, Przegląd Spawalnictwa Nr 7, 2014, s. 46-50.
- [10] www.ssab.com, charakterystyka materiału DOMEX 700 MC (<http://www.aedmotorsport.com/docs/a09-domex-700-high-strength-steel-sheet-specs.pdf>)