

Właściwości spoin stali obrabianych termomechanicznie o wysokiej granicy plastyczności

Properties of thermomechanically treated welds of high yield point steel

Streszczenie

W artykule przedstawiono właściwości spoin stali obrabianej termomechanicznie S700 MC o grubości 10 mm wykonanych różnymi metodami spawania, przy różnych energiach liniowych. Badania metalograficzne, wytrzymałościowe oraz pomiar twardości pozwoliły na ocenę struktury i właściwości spoin oraz określenie wpływu ilości ciepła dostarczonego do obszaru spawania na wytrzymałość na rozciąganie, udarność i twardość spoin.

Abstract

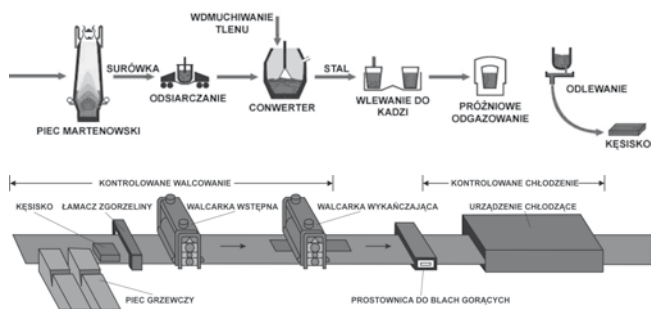
The article presents the properties of thermomechanically treated welds of S700 MC 10 mm thick steel. Welds are made with various methods of welding, and with different welding energies. The metallographic study, tensile test results and hardness measurement show the structure and properties of the welds. Moreover, it is obtained the effect of heat input to the welding area on the tensile strength, toughness and hardness of welds.

Wstęp

W ostatnich latach obserwuje się wzrost światowego udziału konstrukcji spawanych wykonanych ze stali o podwyższonej i wysokiej granicy plastyczności. Wymagania jakościowe stawiane w takich gałęziach przemysłu, jak: stoczniowy, budowy dróg i mostów, hydroenergetyki i energetyki jądrowej, konstrukcji platform wiertniczych, rurociągów oraz maszyn budowlanych sprawiły, że opracowano i wdrożono nowe technologie w dziedzinie metalurgii stali oraz obróbki plastycznej i cieplnej pozwalające na uzyskanie finalnych wyrobów w postaci blach i rur o wysokiej wytrzymałości bez obniżenia ich właściwości plastycznych. Opracowanie nowych gatunków stali spawalnych oraz wzrost wymagań stawianych konstrukcjom spawanym zmusza do podjęcia szczegółowych badań nad czynnikami wpływającymi na zachowanie się tych materiałów w czasie spawania i wykonanych z nich konstrukcji podczas eksploatacji. Przykładem mogą być spawalne stale

walcowane termomechanicznie, zwłaszcza te, które osiągają granicę plastyczności rzędu 700 MPa. Wprowadzenie stali obrabianych termomechanicznie o wysokiej granicy plastyczności i stosunkowo niskim równoważniku węgla pozwoli w znacznym stopniu ograniczyć czas wykonywania prac spawalniczych przez obniżenie temperatury podgrzania wstępnego lub nawet całkowitą rezygnację z tego zabiegu, zmniejszenie przekrojów elementów konstrukcyjnych, dzięki czemu konstrukcje spawane o tej samej nośności będą bardziej smukłe i lżejsze. Zastosowanie takich stali obniży koszty spawania w wyniku zmniejszenia przekroju spoin, co prowadzi do zmniejszenia zużycia materiałów dodatkowych, skrócenia czasu spawania, mniejszych nakładów na prostowanie konstrukcji i badanie spoin [1, 2]. Aspekty techniczne i ekonomiczne wynikające z możliwości wytwarzania wyrobów hutniczych z tych stali w energooszczędnych zintegrowanych liniach produkcyjnych oraz ich przydatność do budowy różnorodnych konstrukcji, w tym także eksploatowanych w ekstremalnie trudnych warunkach klimatycznych, decydują o zainteresowaniu naukowym tą grupą materiałów i doskonaleniu technologii ich wytwarzania i łączenia metodami spawalniczymi (rys. 1).

Dr inż. Jacek Górka – Politechnika Śląska, Gliwice



Rys. 1. Schemat linii produkcyjnej do wytwarzania stali TMCP [3, 4]
Fig. 1. Scheme of the production line of TMCP steel [3, 4]

Przydatność tych materiałów do wytwarzania konstrukcji spawanych bardzo często zależy od czynników, które do tej pory były uwzględniane w niewielkim stopniu przy ocenie ich spawalności. Istotnym problemem w tych stalach jest wpływ mikrododatków stopowych (niobu, wanadu) na spawalność i właściwości połączeń spawanych. Rola mikrododatków w tych stalach sprowadza się do wytworzenia, w czasie kontrolowanego walcowania, odpowiedniej dyspersji wydzieleni węglików, azotków i węglikoazotków niobu i wanadu podwyższających ich właściwości wytrzymałościowe przez umocnienie wydzieleniowe i ograniczenie wielkości ziarna [5÷7]. Rozdrobnienie ziarna sprzyja również zachowaniu dobrych właściwości plastycznych stali. Badania spawalności ujawniły, że duże trudności przy spawaniu stali obrabianych termomechanicznie sprawiają właściwości spoin, a w mniejszym stopniu właściwości SWC. Czynnikiem mogącym mieć wpływ na właściwości spoin stali obrabianych termomechanicznie są niekontrolowane procesy wydzieleniowe faz międzymetalicznych MX (drobnodispersyjne wydzielenia węglików/węglikoazotków Nb (C, N), V (C, N) i innych), które w znacznym stopniu mogą obniżać właściwości plastyczne spoin i odporność na pękanie [5÷7]. Wydzielanie się faz MX jest procesem dyfuzyjnym, którego szybkość można określić za pomocą dyfuzji wyrażonej wzorem Arrheniusa [8]:

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

gdzie: D_0 – stała, m^2/s , Q – energia aktywacji dyfuzji, R – stała gazowa, T – temperatura bezwzględna.

Tablica I. Skład chemiczny wg PN EN 10149-2 i właściwości mechaniczne stali S700 MC walcowanej termomechanicznie do kształtowania na zimno
Table I. Chemical composition acc. to PN EN 10149-2 and mechanical properties of thermomechanical rolled S700 MC steel for cold forming

Stężenie pierwiastków, % wag.												
C max.	Si max.	Mn max.	P max.	S max.	Al _{całk} min.	Nb max*	V max.	Ti max.	B max.	Mo max.	Ce** max.	
0,12	0,60	2,10	0,008	0,015	0,015	0,09	0,20	0,22	0,005	0,50	0,61	
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			
* Suma zawartości Nb, V i Ti powinna wynosić max. 0,22%, ** Ce – równoważnik węgla liczony wg wzoru $Ce = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}$ %												

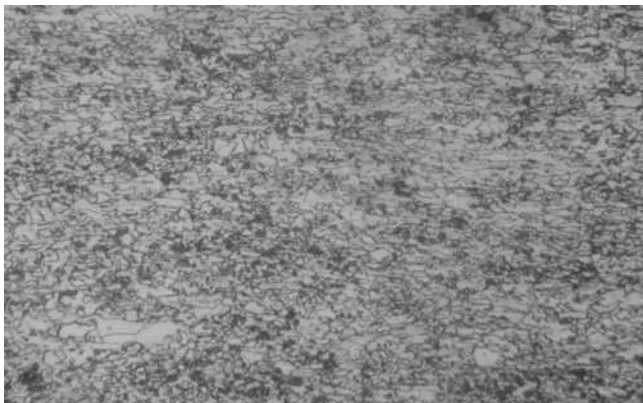
Tablica II. Skład chemiczny stali S700 MC
Table II. Chemical composition of S700 MC steel

Stężenie pierwiastków, % wag.											
C	Mn	Si	S	P	Al	Nb	Ti	V	N*	Ce	
0,056	1,68	0,16	0,005	0,01	0,027	0,044	0,12	0,006	72	0,33	
* N zawartość podana w ppm, azot wyznaczony metodą ekstrakcji wysokotemperaturowej											

Warto również zwrócić uwagę na niekorzystny wpływ azotu, który odpowiada za procesy starzenia. Sam materiał rodzimy zawiera wystarczającą ilość aktywnego w stosunku do azotu tytanu i aluminium, które tworzą trwałe i mało rozpuszczalne w austenicie wydzielenia TiN i AlN. W spoinie zawartość tytanu będzie zależała od parametrów spawania i przy zbyt dużej zawartości azotu w stali może być niewystarczająca do ograniczenia procesów starzeniowych, co spowoduje pogorszenie właściwości eksploatacyjnych spoin.

Badania własne

Stale konstrukcyjne walcowane termomechanicznie są uznawane za dobrze spawalne ze względu na wysoką czystość metalurgiczną oraz niski równoważnik węgla C_e [5, 6]. Spotykane w literaturze zalecenia odnośnie spawania stali obrabianych termomechanicznie dotyczą materiału dodatkowego do spawania, ograniczenia wodoru w spoinie dzięki stosowaniu procesów niskowodorowych oraz ograniczenia temperatury podgrzania wstępnego, która powinna być $50\div 80^\circ C$ niższa niż w przypadku stali normalizowanych oraz ulepszanych cieplnie i nie powinna przekraczać $100^\circ C$. Uzyskanie spoin o właściwościach zbliżonych do właściwości tych stali (R_m , KV) wymaga zastosowania spoin o wyższej niż w materiale rodzimym zawartości składników stopowych, co wiąże się z podwyższeniem równoważnika węgla oraz możliwością pogorszenia spawalności wskutek niekontrolowanych procesów wydzieleniowych w obszarze spoiny. W konsekwencji w przypadku złączy spawanych stali obrabianych termomechanicznie uzyskuje się spoiny niejednorodne pod względem struktury i składu chemicznego (równoważnik węgla). Skład chemiczny spoiny i wartość równoważnika węgla jest więc wypadkową stopnia wymieszania materiału spawanego i zastosowanego spoiwa [9]. W pracy poddano badaniom złącza ze stali S700 MC (tabl. I i II, rys. 2) o grubości 10 mm spawane różnymi metodami w pozycji podłonej (tabl. III), temperatura podgrzewania osuszającego wynosiła $80^\circ C$, temperatura międzywarstwowa $65^\circ C$.



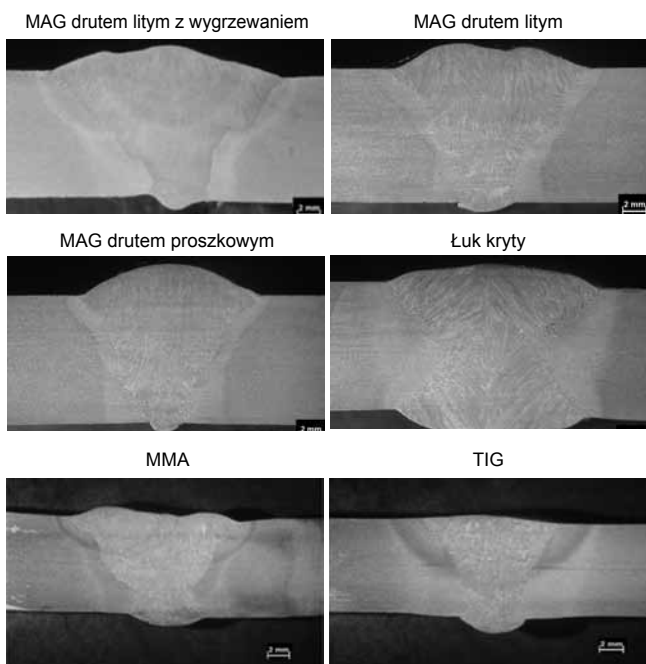
Rys. 2. Bainityczno-ferrytyczna mikrostruktura stali obrabianej termomechanicznie S700MC

Fig. 2. Bainite-ferritic microstructure of thermomechanically treated S700MC steel

Tablica III. Wykonane złącza próbne do badań

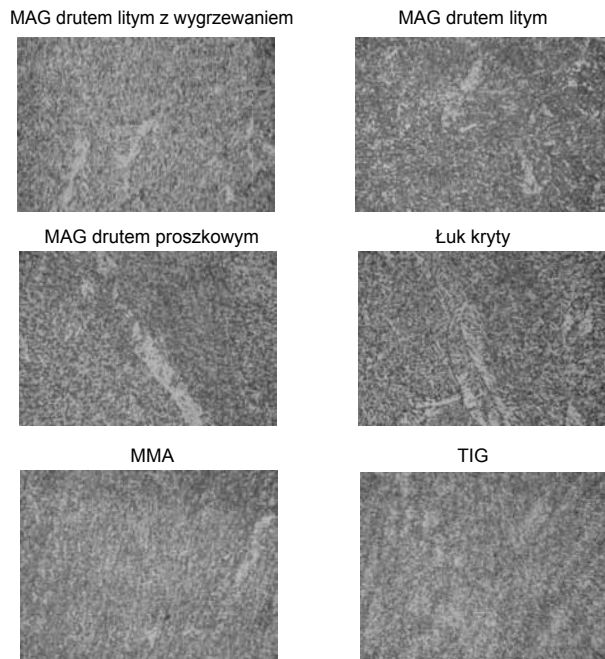
Table III. Sample joints for testing

Oznaczenie	Metoda spawania	Spoivo	Wprowadzona energia liniowa, kJ/cm
MAG + w	MAG drutem litym z wygrzewaniem po spawaniu	G Mn4Ni1,5Cr-Mo	8 Po spawaniu podgrzewanie do temperatury 170÷180°C i bardzo wolne studzenie przez zawinięcie w koce izolacyjne
MAG DL	MAG drutem litym	G Mn3Ni1CrMo	7,5
MAG DP	MAG drutem proszkowym	T Mn2NiMo	6
SAW	Łuk kryty	S Mn3NiMo1	35
MMA	MMA	E Mn2NiCrMo	9
TIG	TIG	G Mn2NiMoCr	28



Rys. 3. Makrostruktura złączy spawanych ze stali S700 MC, trawienie: Adler

Fig. 3. Macrostructure of welded joints of S700 MC steel, etching: Adler



Rys. 4. Mikrostruktura spoiny złączy spawanych ze stali S700MC, trawienie: nital, pow. 200x

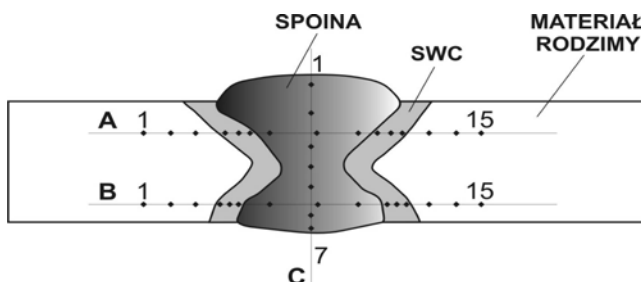
Fig. 4. Microstructure of welded joints of S700MCsteel, etching: nital, magn. 200x

Badania metalograficzne

Wykonane złącza spawane poddano badaniom metalograficznym makroskopowym (rys. 3), na mikroskopie stereoskopowym Olympus SZX9 oraz badaniom mikroskopowym na mikroskopie świetlnym LEICA ME-F4A w obszarze spoiny (rys. 4).

Badania wytrzymałościowe

Wykonane złącza spawane poddano badaniom wytrzymałości na rozciąganie, próbie zginania od strony lica i od strony grani oraz badaniom udarowości w obszarze spoiny w temperaturze – 30°C. Wyniki prób wytrzymałościowych przedstawiono w tablicy IV.



Rys. 5. Schemat rozmieszczenia punktów pomiaru twardości złącza spawanego ze stali S700 MC

Fig. 5. Hardness measurement points distribution scheme of the S700 MC steel welded joint

Tablica IV. Wyniki badań wytrzymałościowych złączy spawanych ze stali S700 MC

Table IV. Results of strength tests of welded joints of S700 MC steel

Metoda spawania	Rozciąganie		Zginanie, kąt gięcia °		Udarność, -30°C	
	R _m , MPa	miejsce zerwania	lico	grań	KV, J/cm ²	przełom
MAG drutem litym z wygrzewaniem po spawaniu	790	spoina	180	180	25	kruchy/bez wad
MAG drutem litym	860	MR	180	180	78	mieszany/bez wad
MAG drutem proszkowym	840	MR	180	180	70	mieszany/bez wad
Łuk kryty	730	spoina	180	180	75	mieszany/bez wad
MMA	820	przejście	180	180	88	mieszany/bez wad
TIG	750	spoina	180	180	30	kruchy/bez wad

Tablica V. Wyniki rozkładu twardości HV30 w obszarach złącza spawanego stali S700 MC

Table V. Results of HV30 hardness distribution in the areas of the welded joint of S700 MC steel

Linia pomiarowa	Punkty pomiarowe, wg rys. 5														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	MAG drutem litym z wygrzewaniem po spawaniu														
A	278	282	286	240	242	232	272	283	295	258	247	246	289	288	279
B	280	285	284	249	235	246	280	272	278	247	234	244	285	280	284
C*	278	275	282	269	272	268	265								
	MAG drutem litym														
A	282	279	282	271	262	273	294	299	280	257	274	265	285	282	278
B	279	284	282	263	278	269	283	287	279	263	259	270	279	283	280
C*	284	286	284	270	268	269	258								
	MAG drutem proszkowym osłonowym														
A	283	279	280	260	251	259	298	286	285	263	259	268	280	279	282
B	280	281	284	259	263	265	288	284	292	265	259	262	281	278	280
C*	290	287	279	281	277	279	265								
	Łukiem krytym														
A	285	279	281	246	251	243	226	236	238	245	241	251	279	280	282
B	280	280	279	239	245	248	236	228	231	240	248	250	282	281	281
C*	232	228	236	231	229	225	230								
	MMA														
A	280	282	280	262	376	354	308	279	285	365	370	269	280	282	281
B	280	281	282	242	241	234	254	262	259	231	234	250	282	281	281
C*	277	264	293	269	291	258	257								
	TIG														
A	281	281	280	204	279	229	246	246	238	239	269	216	280	282	280
B	282	281	280	220	217	198	239	254	245	198	223	220	281	281	282
C*	246	245	257	280	273	262	266								

* twardość HV1

Pomiary twardości

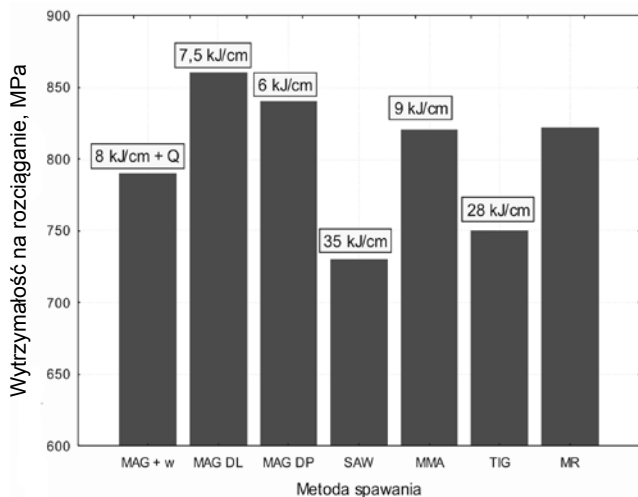
W celu określenia wpływu procesu spawania na zmianę twardości w obszarze złączy spawanych przeprowadzono pomiar twardości metodą Vickersa przy obciążeniu 1 i 30 kG według schematu jak na rysunku 5. Wyniki pomiarów twardości przedstawiono w tablicy V.

Podsumowanie

Ocenie poddano spoiny stali obrabianej termomechanicznie S700 MC wykonane różnymi metodami spawalniczymi oraz z różną ilością wprowadzonego ciepła do obszaru złącza spawanego. Badania metalograficzne makroskopowe nie wykazały występowania żadnych niezgodności spawalniczych. Wykazały natomiast, że spoina ma strukturę ferrytyczno-bainityczną.

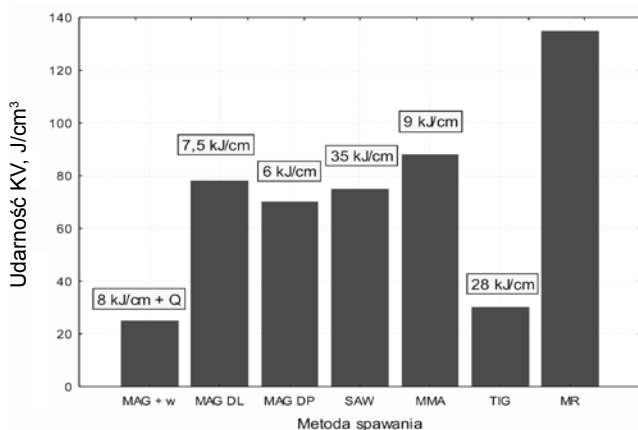
Przeprowadzona we wcześniejszych pracach rentgenowska analiza fazowa w obszarze spoiny oprócz faz Fe_α wykazała dodatkowo istnienie faz Fe_γ, prawdopodobnie austenitu szczątkowego, który niekorzystnie wpływa na właściwości eksploatacyjne konstrukcji spawanych pracujących w warunkach obciążeń wytrzymałościowych i cieplnych [9]. Badania wytrzymałości na rozciąganie złączy spawanych wykazały, że przy zachowaniu energii liniowej spawania poniżej 10 kJ/cm wytrzymałość złączy spawanych przewyższa wytrzymałość na rozciąganie materiału rodzimego. Zastosowanie wysokich energii liniowych spawania (powyżej 25 kJ/cm) prowadzi do wyraźnego obniżenia wytrzymałości na rozciąganie (rys. 6). Spowodowane jest to prawdopodobnie procesami częściowej rekrytalizacji i rozrostem ziarna w obszarach złącza spawanego.

Próba zginania wykazała, że złącza spawane charakteryzują się dobrymi właściwościami plastycznymi. W każdym przypadku osiągnięto kąt gięcia 180° (tabl. IV), na powierzchni nie zaobserwowano żadnych



Rys. 6. Wytrzymałość na rozciąganie złączy spawanych ze stali S700 MC

Fig. 6. Tensile strength of the welded joints of S700 MC

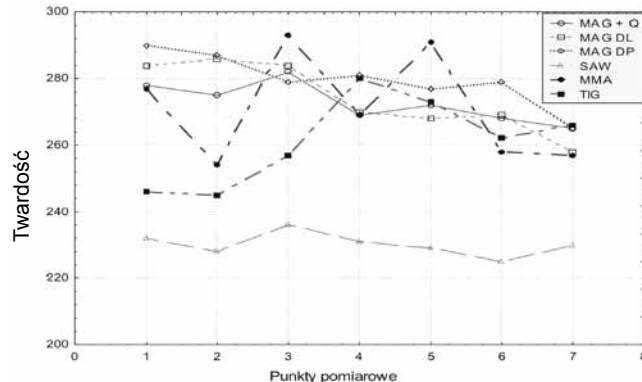


Rys. 7. Udarność spoin złączy spawanych ze stali S700 MC

Fig. 7. Impact strength of the welded joints of S700 MC

Wnioski

Należy stwierdzić, że w przypadku spawania stali obrabianych termomechanicznie o wysokiej granicy plastyczności bardzo ważna jest ilość ciepła wprowadzona do obszaru złącza spawanego. Energia liniowa spawania powinna być ograniczona do 10 kJ/cm. Również dodatkowe ciepło dostarczone do złącza po spawaniu może spowodować gwałtowne obniżenie właściwości złącza, zwłaszcza udarności materiału spoiny. Zbyt duża ilość ciepła dostarczona do obszaru złącza spawanego powoduje rekrytalizację oraz rozrost ziarna w obszarze SWC, co skutkuje utratą właściwości nabytych w wyniku obróbki termomechanicznej, a w spoinie może dochodzić do niekontrolowanych procesów wydzieleniowych pogarszających właściwości złączy spawanych.



Rys. 8. Rozkład twardości w obszarze spoiny złączy spawanych ze stali S700 MC

Fig. 8. Hardness distribution in the welded joints of S700 MC

naderwań i rys. Badania udarności wykazały, że ilość ciepła wprowadzona do obszaru złącza silnie wpływa na właściwości spoiny. Przy niskich energiach liniowych spawania spoiny osiągają wysoką udarność rzędu 80 kJ/cm². Przy spawaniu metodą TIG energią liniową 28 kJ/cm dochodzi do obniżenia udarności do poziomu dopuszczalnego 27 J/cm². Również przy spawaniu niską energią liniową metodą MAG z zastosowaniem wygrzewania po spawaniu dochodzi do gwałtownego obniżenia udarności poniżej 27 J/cm² (rys. 7). Utrata udarności spoin może być spowodowana drobnodispersyjnymi wydzieleniami faz MX w ziarnach ferrytu i bainitu [10], ale wymaga to potwierdzenia dalszymi badaniami naukowymi. Pomiary twardości w obszarze spoiny wykazały, że twardość nie przekracza 300 HV1 (rys. 8). W przypadku złączy wykonanych łukiem krytym twardość jest wyraźnie niższa, ale związane jest to z właściwościami materiału spoiwa.

Literatura

- [1] Tasak E.: Metalurgia spawania, Patria Kraków 2008.
- [2] Brózda J.: Nowoczesne stale konstrukcyjne i ich spawalność, Wydawnictwo Instytutu Spawalnictwa, Gliwice 2009.
- [3] Sueyoshi T., Ishikawa N., Iwase A.: The role of niobium in the retardation of the early stage of austenite recovery in hot-deformed steels. *Materials Science and Engineering*, vol. 250 (1998), No. 1, pp. 2-7.
- [4] Ruukki, Materiały informacyjne firmy RUUKKI.
- [5] Yurioka N.: TMPC steels and their welding. *Welding in the World*. Vol. 35, 6/1995.
- [6] Tasak E.: Spawalność stali, Fotobit, Kraków 2002.
- [7] Zając Z., Langeborg R., Siwecki T.: The role of nitrogen in microalloyed steels. *Microalloying' 95*. Pittsburg 1995.
- [8] Gladman T.: The physical metallurgy of mikroalloyed steels, The Institute of Materials, Cambridge University Press, Cambridge 1997.
- [9] Górka J.: Spawalność stali obrabianej termomechanicznie o wysokiej granicy plastyczności, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, nr 5/2010, s. 165-169.
- [10] Gruszczyk A., Griner S.: Struktura i właściwości połączeń spawanych i zgrzewanych stali obrabianych termomechanicznie. *Przegląd Spawalnictwa* nr 5-6/2006.