

Przemiany strukturalne stali S700MC w warunkach oddziaływania symulowanych cykli cieplnych spawania

The study of structural changes in the TMCP S700MC steel under the influence of simulated welding thermal cycles

Streszczenie

Badania przemian strukturalnych stali S700MC w warunkach oddziaływania symulowanych cykli cieplnych spawania przeprowadzono na prototypowym stanowisku pomiarowym, w którym nagrzewanie badanych próbek odbywało się z wykorzystaniem lamp podczerwieni. Zakres badań obejmował: analizę kontrolną składu chemicznego stali S700MC wraz z zawartością azotu, badania wpływu cykli cieplnych na strukturę i twardość symulowanej strefy wpływu ciepła stali S700MC, wykonanie wykresu przemian austenitu dla warunków spawalniczych CTPC-S, badania metalograficzne mikroskopowe i pomiary twardości próbek ze stali S700MC po symulacji w funkcji czasu chłodzenia $t_{8/5}$. Metodologia badania przemian strukturalnych opierała się na jednoczesnym wykorzystaniu trzech metod pomiarowych: metody dylatometrycznej, metody magnetometrycznej oraz metody analizy termicznej. W trakcie badania dokonano rejestracji trzech wielkości: dylatacji materiału próbki, zmiany strumienia magnetycznego oraz temperatury. Podczas badań przemian strukturalnych realizowano trzy rodzaje cykli cieplnych: cykle szybkie - realizowane z nadmuchem na próbkę gazu chłodzącego i ochronnego, cykle naturalne - realizowane ze swobodnym chłodzeniem próbki (włączony tylko przepływ gazu ochronnego), cykle wolne - realizowane z dogrzewaniem lampami w fazie chłodzenia próbki. Na podstawie badań przemian strukturalnych stali S700MC w warunkach oddziaływania symulowanych warunków cieplnych wyznaczono wykres CTPC-S w zakresie czasu stygnięcia $t_{8/5}$ od 2 do 200 s wraz z wykresem uzupełniającym rozkładu twardości w funkcji czasu chłodzenia oraz określono zmiany strukturalne zachodzące w badanym materiale.

Słowa kluczowe: stal S700MC, cykl cieplny spawania, SWC, wykres CTPC-S

Abstract

Structural transformation studies of S700MC steel were carried out using a prototype bench system, wherein the heating of the test samples was done using infrared lamps. The scope of the research included: chemical composition analysis of S700MC steel together with a nitrogen content, study of the effect of thermal cycles on the structure and hardness of the simulated heat affected zone of steel S700MC, plotting transformation of austenite to the welding conditions CTT, metallographic microscopy and hardness measurements of S700MC steel samples after the simulation as a function of the cooling time $t_{8/5}$. Methodology of the structural changes study was based on the simultaneous use of three measurement methods: the dilatometric method, magnetometric method and the thermal analysis method. During the study, three parameters were recorded: dilation of the sample, the magnetic flux changes and temperature. During the structural changes study, three types of thermal cycles were used: fast cycles - implemented with blowing cooling and protective gas on sample, natural cycles - realized with the free cooling of the sample (only enabled the flow of protective gas), free cycles - implemented with additional heat lamps during the cooling phase of the sample (only enabled the flow of protective gas). During the study, the phase transformation critical temperatures were determined and transformation graph of austenite CCT for the welding conditions, with regard to cooling time $t_{8/5}$ from 2 to 200 seconds with respect to the complementary graph of hardness distribution as a function of the cooling time and indicates structural changes in the material.

Keywords: S700MC steel, welding thermal cycles, HAZ, chart CCT

Wstęp

Stale wyprodukowane przy zastosowaniu walcowania termomechanicznego charakteryzują się niższym równoważnikiem węgla w porównaniu ze stalami po wyżarzeniu normalizującym o tym samym poziomie granicy plastyczności [1].

Również w zakresie granicy plastyczności powyżej 550 MPa stale walcowane termomechanicznie z przyśpieszonym chłodzeniem i odpuszczaniem posiadają niższy równoważnik węgla aniżeli stale ulepszone cieplnie [2,3]. W związku z znacznie niższym równoważnikiem węgla stale wyprodukowane sposobem walcowania z obróbką termomechaniczną

Dr hab. inż. Jacek Górka – Politechnika Śląska w Gliwicach.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: jacek.gorka@polsl.pl

powinny charakteryzować się znacznie lepszą spawalnością w porównaniu do stali w stanie normalizowanym lub ulepszonej cieplnie o zbliżonej granicy plastyczności. Jedną z podstawowych charakterystyk stali niezbędnych do określenia spawalności są wartości temperatur krytycznych przemian strukturalnych w stalach w stanie stałym podczas nagrzewania i chłodzenia. Analizę przemian fazowych stali przeprowadza się na podstawie wykresów CTPc-S (Czas – Temperatura – Przemiana przy chłodzeniu ciągłym dla warunków Spawalniczych) rozpadu przechłodzonego austenitu w warunkach spawalniczych cykli cieplnych. Wykresy takie stanowią źródło informacji o wpływie cykli cieplnych spawania na strukturę oraz własności spawanej stali. Rodzaj przemian strukturalnych i wynikające z nich własności strefy wpływu ciepła zależne są od temperatury maksymalnej cyklu cieplnego oraz od czasu stygnięcia $t_{8/5}$. Zarówno prędkość chłodzenia jak i ilość wprowadzonego ciepła mają duży wpływ na strukturę strefy wpływu ciepła oraz strukturę spoiny. W trakcie spawania stali walcowanych termomechanicznie dodatkowo do spoiny wprowadzane zostają mikrodotądki niobu, wanadu i tytanu, które podczas chłodzenia wydzielają się w postaci węglików i węglikoazotków lub pozostają w roztworze co ma istotny wpływ na przemiany fazowe i zmiany własności złączy spawanych [4÷8]. Zjawiska te powodują wzrost udziału produktów przemiany bezdyfuzyjnej i pośredniej (bainitycznej) w wyniku czego może dojść do obniżenia udatności, zwłaszcza w przypadku szerokiej strefy wpływu ciepła [5,7].

Badania własne

Badana stal S700MC o grubości 10 mm posiada strukturę bainityczno-ferrytyczną, charakterystyczną dla stali poddanej obróbce termomechanicznej z przyspieszonym chłodzeniem. Obróbka termomechaniczna stali S700MC prowadzi do zdefektowania struktury i jej przesylenia składnikami umacniającymi. Struktura stali, została utwardzona wydzieleniowo, roztworowo oraz poprzez zgmiot. Przeprowadzona analiza składu chemicznego stali S700MC, metodą analizy spektralnej OES, potwierdziła zgodność składu chemicznego z normą PN EN 10149-2. W badanej stali zawartość węgla wynosi 0,056%, zawartość mikrodotądki odpowiadających za umocnienie: tytanu – 0,12%, niobu – 0,044%, wanadu – 0,006%. Suma mikrodotądki stopowych nie przekracza dopuszczalnej ilości 0,22%. Wyznaczona zawartość azotu metodą ekstrakcji wysokotemperaturowej wynosi około 70 ppm, co jest wynikiem zgodnym z dostarczonym atestem badanego materiału.

Badania przemian strukturalnych stali S700MC w warunkach oddziaływania symulowanych cykli cieplnych spawania

Badania przemian strukturalnych stali S700MC przeprowadzono na prototypowym stanowisku pomiarowym (Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach), w którym nagrzewanie badanych próbek odbywało się z wykorzystaniem lamp podczerwieni (rys. 1) [9].

Zakres badań obejmował:

- analizę kontrolną składu chemicznego stali S700MC wraz z zawartością azotu,
- badania wpływu cykli cieplnych na strukturę i twardość symulowanej strefy wpływu ciepła stali S700MC - badania symulacyjne,
- wykonanie wykresu przemian austenitu dla warunków spawalniczych CTPC-S,

- badania metalograficzne mikroskopowe i pomiary twardości próbek ze stali S700MC po symulacji w funkcji czasu chłodzenia $t_{8/5}$ (czas chłodzenia w zakresie temperatur pomiędzy 800 a 500 °C).

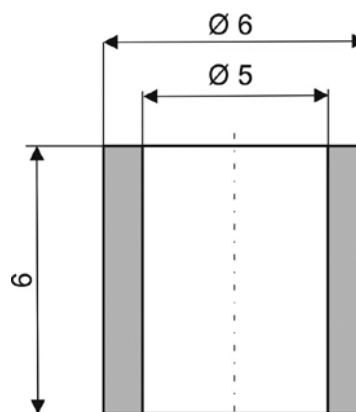
Kontrolną analizę składu chemicznego stali S700MC przeprowadzono przy użyciu spektrometru iskrowego typu SPECTROLAB firmy SPECTRO oraz analizatora azotu typu TC 436 firmy LECO. Badania przemian strukturalnych przeprowadzono na próbkach pobranych ze stali S700MC o kształcie i wymiarach jak na rysunku 2.

Metodyka badania przemian strukturalnych opierała się na jednoczesnym wykorzystaniu trzech metod pomiarowych: metody dylatometrycznej, metody magnetycznej oraz metody analizy termicznej. W trakcie badania dokonano rejestracji trzech wielkości: dylatacji materiału próbki, zmiany strumienia magnetycznego oraz temperatury. Do pomiaru dylatacji próbki zastosowano czujnik bezstykowy (laserowy). Pomiar temperatury został wykonany za pomocą termopar powierzchniowych, które charakteryzują się większą dynamiką pomiaru w porównaniu do termopar objętościowych.



Rys. 1. Widok ogólny stanowiska do badania przemian fazowych w stalach w warunkach spawalniczych

Fig. 1. A general view of the position to study the structural changes in steels welding conditions



Rys. 2. Kształt i wymiary próbek do badania przemian fazowych stali S700MC w warunkach oddziaływania cykli cieplnych spawania

Fig. 2. Shape and dimensions of samples for testing of structural steel S700MC under the influence of welding thermal cycles

Podczas badań przemian strukturalnych realizowano trzy rodzaje cykli cieplnych:

- cykle szybkie - realizowane z nadmuchem na próbkę gazu chłodzącego i ochronnego,
- cykle naturalne - realizowane ze swobodnym chłodzeniem próbki (włączony tylko przepływ gazu ochronnego),

– cykle wolne - realizowane z dogrzewaniem lampami w fazie chłodzenia próbki (włączony tylko przepływ gazu ochronnego).

Jako gazu ochronnego i chłodzącego użyto argonu technicznego. Przyjęto, że zakres czasów chłodzenia próbki w zakresie temperatury między 800 a 500 °C (czas $t_{8/5}$) będzie wynosił od 1 do 200 s, a temperatura maksymalna cykli T_{max} będzie wynosiła minimum 1300 °C. Zestawienie

parametrów (zadanych i zmierzonych) cykli cieplnych badanej stali wraz z szybkością nagrzewania poszczególnych próbek od temperatury początkowej do osiągnięcia temperatury maksymalnej cyklu cieplnego zamieszczono w tabelicy I. Wartości rzeczywiste czasów chłodzenia $t_{8/5}$ i temperatury maksymalnej poszczególnych cykli cieplnych odczytano w programie TPF z zarejestrowanych krzywych pomiarowych. Po zarejestrowaniu, na stanowisku

Tablica I. Parametry zadane i rzeczywiste symulowanych cykli cieplnych stali S700M

Table I. Input parameters and actual simulated thermal cycles of S700MC steel

Lp.	Rodzaj cyklu	Czas chłodzenia $t_{8/5}$, s		Temperatura maksymalna cyklu T_{max} , °C		Szybkość nagrzewania, °C/s
		Zadany	Rzeczywisty	Zadana	Rzeczywista	
1	szybki	1	1,82	1250	1336	257
2		2	2,32		1317	206
3		3	3,40		1325	225
4		4	4,68		1329	221
5		5	5,38		1345	223
6		8	8,18		1321	214
7		10	10,20		1333	237
8		12	11,90		1324	236
9		13	12,96		1327	229
10		14	14,12		1320	205
11		15	15,92		1321	228
12	naturalny	17	17,32		1347	230
13		18	18,55		1327	214
14		19	20,86		1342	228
15		20	21,38		1345	226
16		22	23,44		1334	220
17	wolny	25	25,86		1337	212
18		28	27,90		1342	214
19		30	29,98		1332	204
20		32	31,56		1349	201
21		35	34,72		1324	201
22		38	37,72		1329	225
23		40	39,52		1334	245
24		45	44,36		1341	209
25		50	49,20		1354	219
26		55	53,88		1321	240
27		60	58,70		1335	211
28		70	68,28		1338	205
29		80	78,04		1329	225
30		90	87,84		1327	201
31		100	97,18		1334	205
32		150	148,38		1352	207
33		200	195,76		1336	221

badawczo-pomiarowym, przebiegu poszczególnych cykli cieplnych dla każdej kombinacji parametrów cyklu (T_{max} i $t_{8/5}$), dokonano archiwizacji krzywych pomiarowych pierwotnych: temperatury, strumienia magnetycznego oraz dylatacji (rozszerzalności termicznej), a następnie przy użyciu programu TPF Temperatury Przemian Fazowych ver. 3.0 wyznaczono wartości temperatur krytycznych poszczególnych przemian strukturalnych [10].

W celu łatwiejszego posługiwania się krzywymi pomiarowymi podczas określania wartości temperatur krytycznych przemian przedstawiono je w funkcji temperatury, a zakres analizowanych krzywych ograniczono jedynie do fazy chłodzenia. Ponadto krzywą pierwotną danej wielkości poddano transformacji na pierwszą i drugą pochodną. Określenia punktów charakterystycznych na krzywych pomiarowych, które odpowiadają temperaturze początku i końca poszczególnych przemian strukturalnych austenitu zachodzących w badanej stali przy określonych parametrach cyklu cieplnego, dokonano poprzez poprowadzenie linii stycznych do krzywych pomiarowych i ustalenie punktu odchylenia stycznej od krzywej pomiarowej. W analogiczny sposób postępowano przy analizie krzywej dylatometrycznej. Przy każdej analizowanej krzywej oraz w kolejnych cyklach cieplnych różniących się wartością czasu chłodzenia $t_{8/5}$, w momencie wyznaczenia punktu charakterystycznego na krzywej, program TPF generował w aktywnym oknie tabelicę, w której były gromadzone wartości temperatury odpowiadające wyznaczonym punktom charakterystycznym. Tworzenie i edycję wykresu przemian strukturalnych CTPc-S przeprowadzono w module programu TPF [10]. Następnie na próbkach ze stali S700MC z zasymulowanymi obszarami SWC przeprowadzono badania metalograficzne mikroskopowe przy użyciu mikroskopu świetlnego odwróconego typu MEF4M firmy Leica, współpracującego z komputerem wyposażonym w oprogramowanie OMNIMET Enterprise firmy Buehler. Odczynnikami trawiącymi był nital. W następnej kolejności, na zglądach metalograficznych, przeprowadzono pomiary twardości metodą Vickersa przy obciążeniu 49,05 N (HV5) zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 9015-1.

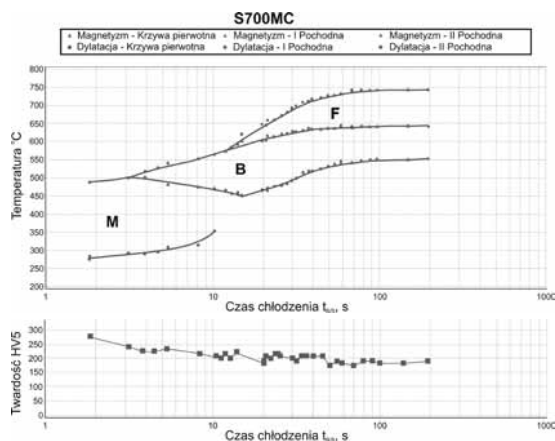
Analiza wyników badań przemian strukturalnych stali S700MC w warunkach oddziaływania symulowanych cykli cieplnych spawania

Na podstawie badań przemian strukturalnych stali S700MC w warunkach oddziaływania symulowanych warunków cieplnych wyznaczono wykres CTPc-S wraz z wykresem uzupełniającym rozkładu twardości w funkcji czasu chłodzenia $t_{8/5}$ (rys. 3).

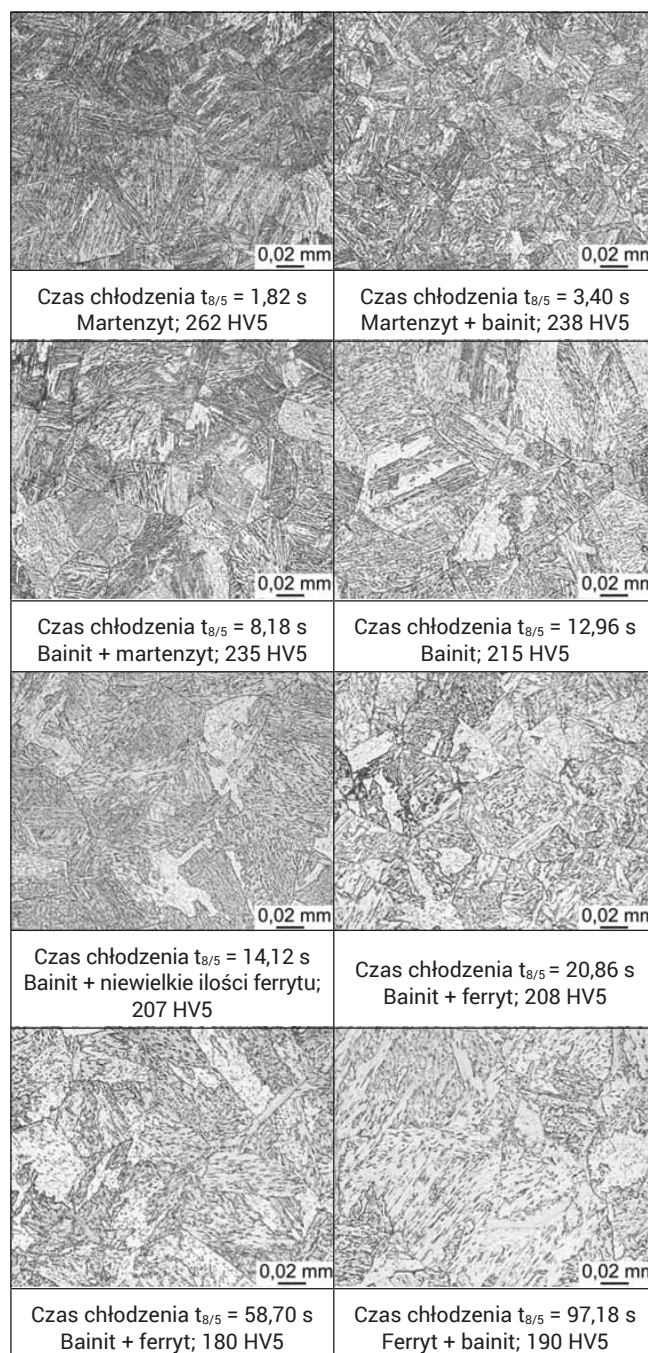
Z przeprowadzonych badań wynika, że w funkcji czasu chłodzenia $t_{8/5}$ mikrostruktura stali S700MC zmienia się w następujący sposób (rys. 4):

- przy czasie chłodzenia $t_{8/5}$ krótszym od ok. 3 s występuje martenzyt,
- przy czasie chłodzenia $t_{8/5}$ od ok. 3 do ok. 10 s występuje mieszanina martenzytu i bainitu,
- w zakresie czasu chłodzenia $t_{8/5}$ od ok. 10 do ok. 14 s występuje bainit,
- przy czasie chłodzenia $t_{8/5}$ dłuższego od 14 s zaczyna pojawiać się ferryt,
- w zakresie czasu chłodzenia $t_{8/5}$ od ok. 60 s do ok. 200 s mikrostrukturę stali stanowi mieszanina bainitu i ferrytu.

Uzyskane wyniki badań pokazują, że procesy związane z przemianą alotropową γ - α zachodzące w stali S700MC podczas stygnięcia nie mogą stanowić podstawy oceny jej własności spawalniczych. Zgodnie z wyznaczonym wykre-

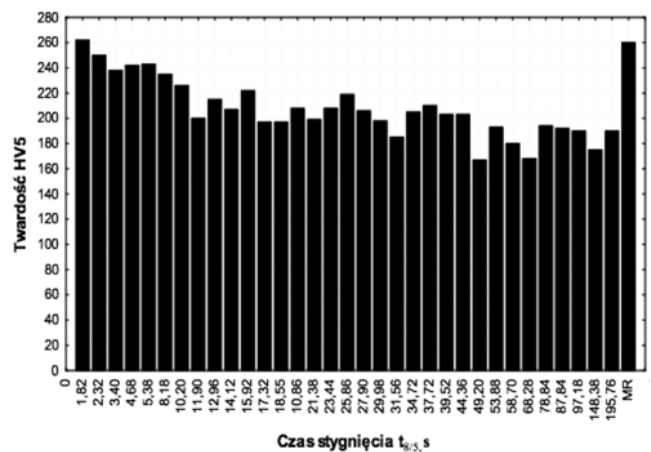


Rys. 3. Wykres przemian fazowych w stali S700MC w warunkach spawalniczych CTPc-S wraz z wykresem uzupełniającym dotyczącym zmiany twardości w funkcji czasu chłodzenia $t_{8/5}$
Fig. 3. Chart of structural changes in the steel S700MC in terms of welding CCT-S together with complementary graph on the distribution of hardness as a function of the cooling time $t_{8/5}$



Rys. 4. Mikrostruktura stali S700MC w funkcji czasu stygnięcia $t_{8/5}$
Fig. 4. S700MC steel microstructure as a function of the cooling time $t_{8/5}$

sem CTPc-S w stali S700MC zachodzi przemiana martenzytyczna, lecz nie skutkuje to wzrostem twardości (rys. 5) w stosunku do twardości materiału rodzimego. Potwierdza to tezę, że węgiel znajdujący się w roztworze, w niewielkim stopniu bierze udziału w umocnieniu stali i nie jest czynnikiem dominującym w przemianach fazowych. Stal S700MC charakteryzuje się małą hartownością, z powodu małej ilości niezwiązanego węgla (około 0,03%) i innych pierwiastków stopowych. Przy krótkim czasie stygnięcia tworzy się martenzyt, ale jest to martenzyt niskowęglowy, który nie obniża własności plastycznych stali. Przeprowadzone pomiary twardości w całym zakresie analizowanych czasów chłodzenia $t_{8/5}$ nie wykazały skłonności stali S700MC do pęknięcia zimnego (maksymalna zmierzona twardość nie przekracza wartości 270 HV). Wraz z wydłużaniem czasu stygnięcia twardość maleje, co spowodowane jest przede wszystkim zwiększeniem udziału ferrytu w strukturze badanej stali i rozrostem ziarna.



Rys. 5. Wyniki pomiarów twardości HV5 symulowanych obszarów SWC stali S700MC

Fig. 5. Results of measurements of hardness HV5 simulated HAZ areas of steel S700MC

Podsumowanie

Analiza materiału rodzimego stali S700MC wykazała, że charakteryzuje się ona silnie zdefektowaną strukturą bainityczno-ferrytyczną. Skład chemiczny stali, obecność mikrododatków tytanu i niobu oraz kontrola stopnia zgniotu, temperatury walcowania i szybkości chłodzenia po walcowaniu pozwoliły na osiągnięcie granicy plastyczności na poziomie 700 MPa. Bardzo niska zawartość węgla (0,056%), który w dużej części został związany poprzez Ti oraz Nb, skutkuje zmniejszeniem jego udziału w umocnieniu przez przesylenie roztworu α i ogranicza oddziaływanie w trakcie przemian γ - α . Cykl cieplny spawania znacznie różni się od cyklu obróbki termomechanicznej, przede wszystkim bardzo dużą szybkością nagrzewania i chłodzenia w obszarze SWC, krótkim czasem wytrzymania w temperaturze maksymalnej oraz bardzo często nakładaniem się dwóch lub więcej cykli cieplnych podczas spawania wielowarstwowego. Jednym z elementów oceny spawalności stali jest analiza przemian fazowych austenitu w czasie chłodzenia. W przypadku badanej stali w całym zakresie zmiennego czasu chłodzenia $t_{8/5}$ nie zaobserwowano zmian mogących świadczyć o obniżeniu własności plastycznych w obszarze SWC. Wprawdzie przy bardzo krótkim czasie stygnięcia $t_{8/5}$, poniżej 3 s, zachodzi przemiana martenzytyczna, ale powstaje wówczas martenzyt niskowęglowy o twardości zbliżonej do twardości materiału rodzimego. Uzyskane wyniki badań sugerują, że analiza przemian austenitu zachodzących w stali S700MC podczas stygnięcia nie może stanowić podstawy oceny jej spawalności, która w głównej mierze jest uzależniona od oddziaływania mikrododatków stopowych oraz ich roli w umocnieniu stali.

Praca finansowana z grantu badawczego: „Sterowanie własnościami i strukturą spoin stali obrabianych termomechanicznie o wysokiej granicy plastyczności”, nr N N507 321040, Politechnika Śląska w Gliwicach.

Literatura

- [1] Nishioka K., Ichikawa K.: Progress in thermomechanical control of steel plates and their commercialization, Science and Technology of Advanced Materials, vol. 13, No. 2, April 2012, pp. 1-20.
- [2] Chen B., Yu H.: Hot ductility behaviour of V-Nb microalloyed steels, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, vol. 19, No. 6, June 2012, p. 525.
- [3] Lee, H. Shin, K. Park: Evaluation of high strength TMCP steel weld for use in cold regions, Journal of Constructional Steel Research 74 (2012), pp. 134-139.
- [4] Lisiecki A.: Diode laser welding of high yield steel. Proc. of SPIE Vol. 8703, Laser Technology 2012: Applications of Lasers, 87030S (January 22, 2013), DOI: 10.1117/12.2013429.
- [5] Górka J.: Własności i struktura złączy spawanych stali obrabianej termomechanicznie o wysokiej granicy plastyczności, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
- [6] Grajcar A., Różański M., Stano S.: Effect of heat input on microstructure and hardness distribution of laser welded Si-Al TRIP-type steel, Advances Material Science Engineering. 2014, Article ID 658947, pp. 1 ÷ 8.
- [7] Górka J.: Weldability of thermomechanically treated steels having a high yield point, Archives of Metallurgy and Materials, Volume 60, Issue 1/2015, pp. 469-475.
- [8] Górka J.: Changes in the structure and properties of the steel S700MC by heat treatment, Advanced Material Research, vol. 1036/2014, pp. 111-116.
- [9] Mikno Z., Grzesik B., Łomozik M., Zeman M., Pilarczyk A.: Opracowanie systemu metodyki pomiarowej w badaniach przemian strukturalnych w stalach, w warunkach cykli cieplnych spawania. Projekt badawczy własny nr N505 002 31/0255, Instytut Spawalnictwa, Gliwice 2006-2009.
- [10] Łomozik M., Pilarczyk A.: TPF 3.0 do tworzenia wykresów przemian fazowych austenitu w stalach w warunkach spawalniczych CTPc-S. Przegląd Spawalnictwa, nr 3, 2012, s. 23-27.