

# Wpływ maksymalnej temperatury cyklu cieplnego na właściwości symulowanej SWC stali obrabianej termomechanicznie S700MC

Influence of the maximum temperature of the thermal cycle on properties of the simulated HAZ thermomechanically treated steel S700MC

## Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu maksymalnej temperatury cyklu cieplnego na właściwości symulowanej SWC stali obrabianej termomechanicznie o wysokiej granicy plastyczności S700MC. Badania przeprowadzono na specjalnie zbudowanym stanowisku badawczym wyposażonym w rezystancyjne źródło nagrzewania, kamerę termowizyjną Variocam Head HR i stanowisko komputerowe. Badania symulacji cykli cieplnych polegały na nagrzewaniu rezystancyjnym próbek przygotowanych do badania udarności oraz rejestracji cyklu cieplnego nagrzewania i chłodzenia. Symulowano pojedyncze cykle cieplne w zakresie temperatury od 400 do 1300°C, co 100°C, oraz cykle złożone. W czasie badania rejestrowano przebieg temperatury w funkcji czasu oraz wyznaczono następujące parametry:

- $T_{max}$  – maksymalną temperaturę cyklu,
- $t_n$  – czas nagrzewania próbki od temp. 50°C do  $T_{max}$ ,
- $t_8$  – czas, po jakim temp. obniżyła się do 800°C,
- $t_5$  – czas, po jakim temp. obniżyła się do 500°C,
- $t_{8/5}$  – czas stygnięcia w zakresie temp. 800÷500°C.

Uzyskane próbki po procesie symulacji zostały podane badaniom udarności, pomiarowi twardości oraz badaniom metalograficznym mikroskopowym. W celu określenia właściwości wytrzymałościowych i plastycznych symulowanej strefy wpływu ciepła stali S700MC przeprowadzono próbę rozciągania materiału na próbkach okrągłych.

## Abstract

In this paper an influence of simulated thermal cycle on properties and HAZ structure of thermomechanically treated steel S700MC. The simulation of thermal cycles was carried out on a specially built test stand equipped with resistive heating source infrared camera Variocam Head HR with 50 mm lens and a computer with software IRBIS 3 plus. Simulation was prepared for simple and complex thermal cycle. Simulation studies of thermal cycles consisted of resistive heating of samples prepared for the impact test. Single thermal cycles were simulated at temperatures ranging from 400 to 1300 °C, 100 °C and the cycle complex. For each temperature three repeats were carried out. During the course of the study, the temperature was recorded as a function of time and the following parameters were established:

- $T_{max}$  – specimen max. temperature,
- $t_n$  – specimen heating time from 50°C up to  $T_{max}$ ,
- $t_8$  – time for temperature decreasing below 800°C,
- $t_5$  – time for temperature decreasing below 500°C,
- $t_{8/5}$  – specimen cooling time (temperatures range 800÷500°C).

The resulting sample, the simulation process, have been tested toughness, hardness measurement and metallogical research microscope. In order to determine the strength and plastic properties of simulated heat-affected zone S700MC steel tensile test was carried out on samples of material round.

## Wstęp

Spawalność materiałów konstrukcyjnych można wyznaczyć za pomocą metod teoretycznych, które mają na celu analizę przemian fazowych stali w procesie spawania, jak również przez analizę właściwości materiału w strefie wpływu ciepła (SWC). Analizę przemian fazowych stali przeprowadza się na podstawie wykresów CTPc-S rozpadu przechłodzonego austenitu w warunkach spawalniczych cykli cieplnych. Cykl cieplny spawania, czyli zmiany temperatury punktów złącza w czasie, obejmuje zmiany temperatury pod wpływem przepływu ciepła w każdym punkcie danej objętości oraz efekty działania tych zmian. Rodzaj cyklu cieplnego, jakiego został poddany dany metal spoiny, jak i SWC, ma wpływ na właściwości strukturalne i mechaniczne. Sterowanie dynamiką przepływu ciepła jest warunkiem pomyslnego przeprowadzenia procesu spawania. Rodzaj przemian strukturalnych i wynikające z nich właściwości strefy wpływu ciepła zależne są od temperatury maksymalnej cyklu cieplnego oraz od czasu stygnięcia  $t_{8/5}$ . Ze wzrostem temperatury maksymalnej zwiększa się stopień przegrzania austenitu, rozrost jego ziaren oraz ilość rozpuszczonych w austenicie wydzieleni, co opóźnia przemianę  $\gamma \rightarrow \alpha$  podczas chłodzenia i przesuwają ją w kierunku niższej temperatury. Chcąc określić najbardziej niekorzystne właściwości SWC, należy brać pod uwagę przede wszystkim cykle cieplne o najwyższej temperaturze maksymalnej. Warunki austenitowania występujące w SWC różnią się od warunków stosowanych podczas obróbki cieplnej [1÷3]. Przy spawaniu stali drobnoziarnistych wysokowytrzymałych należy zwrócić uwagę na:

- stosowanie właściwych materiałów dodatkowych do spawania, zawierających składniki stopowe zapewniające odpowiedni poziom właściwości wytrzymałościowych spoiny w stosunku do materiału rodzimego
- ilość wprowadzonego ciepła do złącza – energię liniową, temperaturę międzyścigową [4]
- strukturę spoin (spoiny wielościęgowe).

Mikrostruktura SWC wielościęgowego złącza spawanego zależy od składu chemicznego stali, intensywności źródła ciepła oraz liczby układanych ściegów. Zarówno

prędkość chłodzenia, jak i ilość wprowadzonego ciepła mają duży wpływ na strukturę strefy wpływu ciepła oraz strukturę spoiny. Podczas spawania stali obrabianej termomechanicznie do spoiny wprowadzane zostają mikrododatki niobu, wanadu i tytanu. Podczas chłodzenia wydzielają się one w postaci węglików i węglikoazotków. Ilość wydzieleni zależy od szybkości chłodzenia. Im jest szybsze, tym więcej mikrododatki zostaje zatrzymanych w roztworze. Podobna sytuacja występuje w strefie wpływu ciepła. Ilość mikrododatki, które zostały w roztworze, ma istotny wpływ na przemiany fazowe w czasie chłodzenia i zmiany właściwości po obróbce cieplnej [5, 6]. Powoduje to wzrost udziału produktów przemiany bezdyfuzyjnej i pośredniej (bainitycznej). Struktury te w dużej mierze są przyczyną obniżenia udarność, zwłaszcza w przypadku szerokiej strefy wpływu ciepła. Efekt ten jest potęgowany, gdy spawanie odbywa się z wysokimi energiami liniowymi i wydłuża się czas chłodzenia  $t_{8/5}$ . Zarówno prędkość chłodzenia, jak i ilość wprowadzonego ciepła mają duży wpływ na strukturę strefy wpływu ciepła oraz strukturę spoiny. Przy dużych prędkościach chłodzenia typową strukturą SWC stali obrabianych termomechanicznie jest dolny bainit wykazujący zadowalającą odporność na pękanie kruche. Wprowadzenie dużych ilości ciepła do złącza spawanego wydłuża czas wytrzymania SWC w wysokiej temperaturze i zmniejsza szybkość chłodzenia. Prowadzi to do rozrostu ziarna austenitu i do pojawienia się, szczególnie w strefie przyległej do linii wtopienia, struktur o gorszych właściwościach plastycznych. W strukturze SWC dominuje wtedy bainit górny oraz ferryt pierwotny i boczno płytkowy [7, 8].

## Badania własne

Celem badań było określenie właściwości i struktury obszarów SWC stali S700MC o grubości 10 mm, nagrzewanych do różnych maksymalnych temperatur cyklu cieplnego. Skład chemiczny oraz właściwości mechaniczne stali przedstawiono w tablicach I i II, a strukturę na rysunku 1.

**Tablica I.** Skład chemiczny wg PN EN 10149-2 i właściwości mechaniczne stali walcowanej termomechanicznie do kształtowania na zimno S700MC

**Table I.** The chemical composition according to the regulation PN EN 10149-2 and mechanical properties of the S700 MC steel subjected to thermomechanical treatment used for cold moulding

Stężenie pierwiastków, %											
C max.	Si max.	Mn max.	P max.	S max.	Al <sub>calc.</sub> min.	Nb * max.	V max.	Ti max.	B max.	Mo max.	C <sub>e</sub> ** 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 <sub>m</sub> , MPa			Granica plastyczności R <sub>e</sub> , MPa			Wydłużenie A <sub>5</sub> , %			Udarność, J/cm <sup>2</sup> (-20°C)		
822			768			19			135		

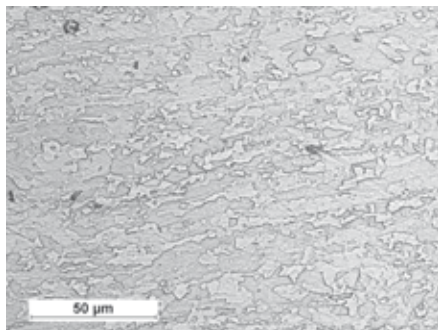
\* Suma zawartości Nb, V i Ti powinna wynosić max. 0,22%.

\*\* C<sub>e</sub> – równoważnik węgla.

**Tablica II.** Rzeczywisty skład chemiczny badanej stali S700MC o grubości 10 mm  
**Table II.** The real chemical composition of the original S700 MC steel material

Stężenie pierwiastków, % wag.										
C	Mn	Si	S	P	Al	Nb	Ti	V	N*	C <sub>e</sub>
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.



**Rys. 1.** Struktura bainityczno-ferrytyczna stali S700MC z widocznymi efektami odkształcenia plastycznego

**Fig. 1.** Structure of bainitic-ferritic steel S700MC with visible effects of plastic deformation

### Symulacja cykli ciepłych spawania

W celu określenia wpływu maksymalnej temperatury cyklu na właściwości poszczególnych obszarów SWC badanej stali przeprowadzono symulację cykli ciepłych na specjalnie zbudowanym stanowisku badawczym wyposażonym w rezystancyjne źródło nagrzewania, kamerę termowizyjną Variocam Head HR oraz stanowisko komputerowe (rys. 2).

Układ rejestracji pól rozkładu temperatury składał się z kamery termowizyjnej Variocam Head HR firmy Infratec oraz komputera z zainstalowanym oprogramowaniem Irbis 3 plus, umożliwiającym na sterowanie parametrami kamery oraz rejestrację obrazów termograficznych na dysku twardym komputera. Zastosowana kamera termowizyjna ma niechłodzoną matrycę detektorów bolometrycznych, umożliwiającą pozyskiwanie obrazów termograficznych o rozdzielczości 640x480 pikseli i pomiar temperatury w zakresie od -40 do 2000°C. Kamerę wyposażono w obiektyw o ogniskowej  $f = 50$  mm, co przy odległości obiektu od badanej próbki wynoszącej

460 mm pozwoliło uzyskać pole widzenia 140x110 mm oraz rozdzielczość przestrzenną obrazu termograficznego (IFOV) na poziomie 0,25 mm. Do pomiaru temperatury kamerę skonfigurowano w taki sposób, aby uzyskać jak najmniejszą niepewność pomiaru. Poza parametrami środowiskowymi, takimi jak temperatura otoczenia oraz wilgotność, przyjęto transmisyjność atmosfery równą 1 i ustalono średnią emisyjność dla stali wynoszącą 0,9. Emisyjność jest kluczowym parametrem decydującym o dokładności pomiaru temperatury z zastosowaniem kamery termograficznej. Jest ona zależna od temperatury i stanu powierzchni obserwowanego obiektu. Przed badaniami przeprowadzono testy mające określić emisyjność próbek, która wahała się w granicach 0,5÷0,9 dla obserwowanej powierzchni w zakresie temperatury 100÷900°C. Podczas symulacji cyklu cieplnego zmieniały się właściwości powierzchni próbki w wyniku powstawania warstwy tlenków, co dodatkowo wpływało na podwyższenie wartości emisyjności. Wyniki wstępnych symulacji cyklu cieplnego próbek testowych potwierdziły, że przyjęta wartość emisyjności pozwala uzyskiwać wiarygodne wyniki obarczone średnim względnym błędem pomiaru temperatury nieprzekraczającym 10%. Tor wizyjny przebiegał na wysokości 1550 mm. Symulację wykonano w temperaturze powietrza 23,7°C oraz wilgotności powietrza 65,7%. Badania symulacji cykli ciepłych polegały na nagrzewaniu rezystancyjnym próbek przygotowanych do badania udarności oraz rejestracji cyklu cieplnego nagrzewania i chłodzenia. Symulowano pojedyncze cykle cieplne w zakresie temperatury 400÷1300°C, co 100°C, oraz cykle złożone. W czasie badania rejestrowano przebieg temperatury w funkcji czasu oraz wyznaczono charakterystyczne parametry cyklu (tabl. III).



**Rys. 2.** Stanowisko badawcze do symulacji i rejestracji cykli ciepłych spawania: a) zgrzewarka rezystancyjna, b) kamera termowizyjna, c) stanowisko komputerowe

**Fig. 2.** Test and simulation of welding thermal cycles registration: a) resistance welding station, b) an infrared camera, c) computer

**Tablica III.** Parametry symulowanych cykli cieplnych stali S700MC  
**Table III.** The parameters of simulated thermal cycles steel S700MC

Lp.	Temperatura $T_{max}$ , °C		Czas $t_n$ s	Czas $t_8$ s	Czas $t_5$ s	Czas $t_{8/5}$ s
	zadana	rzeczywista				
1	400	382	2,9	-	-	-
2		453	3,2	-	-	-
3		440	3,2	-	-	-
4	500	518	2,7	-	-	-
5		552	2,7	-	-	-
6		480	2,8	-	-	-
7	600	619	2,6	-	-	-
8		595	2,1	-	-	-
9		596	2,2	-	-	-
10	700	720	2,8	-	-	-
11		720	2,4	-	-	-
12		736	2,1	-	-	-
13	800	807	2,7	3,3	16,4	13,1
14		793	2,7	2,7	14,7	12,0
15		812	834	3,1	4,0	17,3
16	900	904	3,4	6,6	19,3	12,7
17		929	3,6	7,4	19,8	12,4
18		912	3,6	7,3	19,8	12,5
19	1000	1017	4,3	12,7	23,9	11,2
20		1020	4,1	11,9	23,7	11,8
21		1037	4,3	11,6	24,8	13,2
22	1100	1136	4,4	13,6	25,6	12,0
23		1086	4,2	12,8	23,6	10,8
24		1099	3,9	12,4	23,3	10,9
25	1200	1203	5,7	15,9	29,2	13,3
26		1178	5,4	15,6	29,2	13,6
27		1191	5,3	15,6	30,0	13,6
28	1300	1282	5,2	18,8	33,0	14,2
29		1285	5,9	20,1	34,9	14,8
30		1275	5,7	20,6	35,9	14,2
31	1100(500)/ 700(300)/ 500	1068	4,2	11,8	58,6	46,8
32		1080	3,6	12,1	59,4	47,3
33		1140	3,9	13,1	60,3	47,2
34	1200(500)/ 900(400)/ 700	1240	5,9	28,2	65,0	36,7
35		1190	5,4	26,8	64,3	37,5
36		1238	5,8	27,9	65,1	37,2
37	1300(800)/ 1100(500)/ 900	1299	6,6	36,0	68,2	32,2
38		1278	5,6	20,7	75,5	54,8
39		1321	6,7	39,2	78,2	39,0

### Badania próbek symulowanych

Próbki uzyskane po procesie symulacji zostały podane badaniom udarności zgodnie z PN-EN ISO 148-1:2010, na próbkach z karbem typu V, na młocie udarowym Zwick/Roell RKP 450 w temperaturze  $-30^{\circ}\text{C}$ , a także pomiarowi twardości metodą Vickersa przy

obciążeniu 9,81 N (HV1) na urządzeniu Wilson Wolpert Micro-Vickers 401MVD zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 9015-1. Na każdej próbce wykonano po 7 pomiarów. Następnie dwie skrajne wartości (minimum i maksimum) odrzucono, a dla pozostałych pięciu pomiarów w serii obliczono wartości średnie. Badania

metalograficzne mikroskopowe przeprowadzono na mikroskopie świetlnym Nikon Eclipse MA100, próbki do badań trawiono w nitalu. Badania wytrzymałości na rozciąganie wykonano na podstawie normy PN-EN 10002-1 na próbkach okrągłych. Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej MTS Insight. Maszyna ta umożliwia wymuszanie przemieszczenia belki poprzecznej (trawersu), na której znajduje się czujnik siły, ze stałą prędkością. Czujnik siły, w który jest wyposażona maszyna MTS Insight, pozwala na pomiar siły do 10 kN z dokładnością do dziesiątych części N. W celu spełnienia wymagań dotyczących statycznego testu rozciągania próbek przyjęto prędkość testu: 5 mm/min. Testy statycznego rozciągania prowadzono w temperaturze 24°C przy wilgotności powietrza wynoszącej 59%. W celu uniknięcia deformacji próbek w momencie ich mocowania w uchwytach pneumatycznych maszyny wytrzymałościowej, a przy tym generowania siły wstępnej, tzw. *pre-loadu*, ustalono minimalne ciśnienie zacisku uchwytów, przy którym próbka została zamocowana w sposób pewny. Wartość tego ciśnienia wynosiła 0,27 MPa. Powtarzalność osiowości i głębokości uchwycenia kształtki była możliwa dzięki zastosowaniu uchwytów pryzmatycznych. Głębokość zamocowania próbki w uchwytach była równa długości jej części chwytowej.

## Analiza wyników badań

Symulację cykli cieplnych prostych SWC stali S700MC prowadzono w zakresie temperatury maksymalnej 400÷1300°C oraz wybranych cykli cieplnych złożonych w zakresie temperatury maksymalnej 1100÷1300°C (rys. 3). Czas nagrzewania mieścił się w zakresie 2,3÷5,6 s. Czas chłodzenia  $t_{8/5}$  cykli cieplnych o maksymalnej temperaturze  $T_{max}$  powyżej 800°C utrzymywano na poziomie 11÷15 s. Taki zakres czasu chłodzenia wynikał z analizy badań przemian fazowych austenitu w czasie chłodzenia – wykres CTPc-S [9].

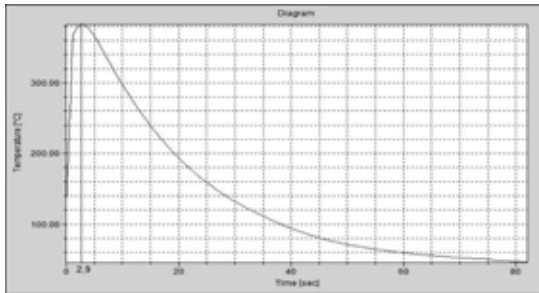
W tym zakresie czasu  $t_{8/5}$  stal S700MC charakteryzuje się strukturą bainityczno-ferrytyczną o relatywnie małym ziarnie i twardości zbliżonej do twardości materiału rodzimego. Badania metalograficzne mikroskopowe symulowanych obszarów SWC wykazały, że w zakresie maksymalnych temperatur cyklu od 400 do 900°C stal S700MC charakteryzuje się drobnoziarnistą strukturą bainityczno-ferrytyczną. Powyżej maksymalnej temperatury cyklu 900°C następuje silny rozrost ziarna i postępuje on do temperatury 1300°C (tabl. IV). Wysoka temperatura maksymalnych cykli cieplnych nagrzewania niweluje wpływ faz umacniających na rozdrobnienie ziarna austenitu i powoduje utratę właściwości nabytych na drodze obróbki termomechanicznej. Szczególnie jest to widoczne w przypadku cykli cieplnych złożonych. Badania mikroskopowe ujawniły obecność dużych wydzielań węglikoazotkowych w obszarach wszystkich symulowanych SWC (tabl. IV), co świadczy o ich wysokiej trwałości termicznej.

Badania twardości symulowanych obszarów SWC wykonane metodą Vickersa wykazały niewielki wpływ przemiany fazowej austenitu podczas chłodzenia na właściwości stali S700MC. Twardość obszarów SWC nagrzewanych w zakresie maksymalnych temperatur cyklu 400÷900°C nie ulega zmianie i jest zbliżona do twardości materiału rodzimego. Wraz ze wzrostem temperatury maksymalnego cyklu cieplnego powyżej 900°C następuje zmiękczenie materiału do poziomu ok. 230 HV1 (rys. 4). Również w przypadku cykli cieplnych złożonych wraz ze wzrostem maksymalnej temperatury cyklu twardość symulowanej SWC maleje.

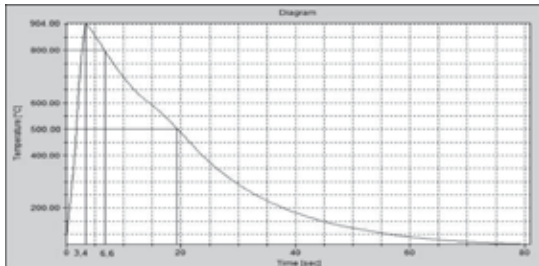
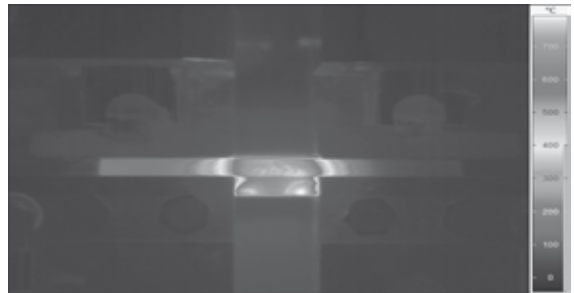
Badania udarności symulowanych obszarów SWC wykonane w temperaturze -30°C wykazały istotny wpływ maksymalnej temperatury cyklu cieplnego na właściwości plastyczne stali. Obszary SWC nagrzewane od 400 do 700°C charakteryzują się udarnością niższą niż udarność materiału rodzimego (rys. 5, 6). Spadek udarności w tym zakresie temperaturowym należy wiązać z procesami starzeniowymi, dyfuzją atomów węgla i azotu na bliskie odległości do jąder dyslokacji i ich zablokowaniem. W zakresie temperatury 800÷900°C następuje gwałtowny wzrost udarności do poziomu 300 J/cm<sup>2</sup>, co należy wiązać z zanikiem umocnienia wydzieleniowego przez koagulację wydzielań i przejściem składników umacniających do osnowy oraz procesami rekryształizacji ziarna [9].

Badania wytrzymałości na rozciąganie próbek okrągłych pobranych z obszarów SWC stali poddanej cyklowi cieplnym w zakresie maksymalnej temperatury 400÷700°C wykazały wytrzymałość na rozciąganie zbliżoną do wytrzymałości materiału rodzimego. Wraz ze wzrostem maksymalnej temperatury cyklu nagrzewania następuje wyraźny spadek wytrzymałości na rozciąganie SWC w stosunku do materiału rodzimego – pow. 100 MPa (rys. 7). Również w cyklach cieplnych złożonych wraz ze wzrostem temperatury nagrzewania SWC maleje, wytrzymałość na rozciąganie. Osiągane wartości wydłużenia SWC nagrzewanej w zakresie temperatury 400÷700°C są na poziomie 12%, przy wydłużeniu materiału rodzimego ok. 16%. Wraz ze wzrostem temperatury nagrzewania SWC wydłużenie maleje osiągając wartości ok. 6% (rys. 8). W przypadku cykli cieplnych złożonych wzrost temperatury nagrzewania SWC również powoduje pogorszenie właściwości plastycznych stali.

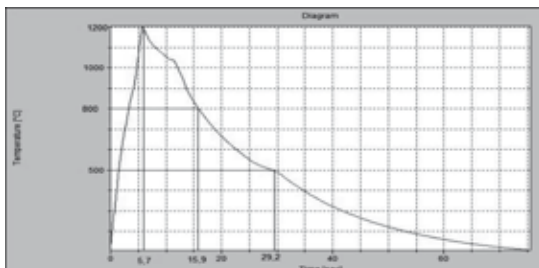
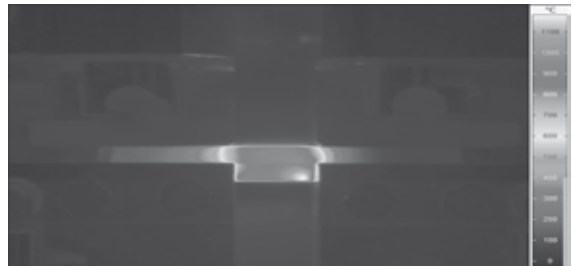
Z przeprowadzonych badań wynika, że rzeczywista SWC na swoim przekroju charakteryzuje się zmiennymi właściwościami. Najbardziej niebezpiecznym obszarem SWC o niskich właściwościach plastycznych jest jej część wysokotemperaturowa, gruboziarnista, nagrzana powyżej 1200°C. Obszary SWC nagrzane do temperatury 800÷900°C charakteryzują się najwyższą udarnością. Widoczny jest wtedy zanik efektu umocnienia wydzieleniowego, ograniczenie rozrostu ziarna i w konsekwencji zmniejszenie odcinka przegrzania SWC. W związku z tym proces spawania należy prowadzić w taki sposób, aby zminimalizować szerokość niekorzystnych obszarów SWC.



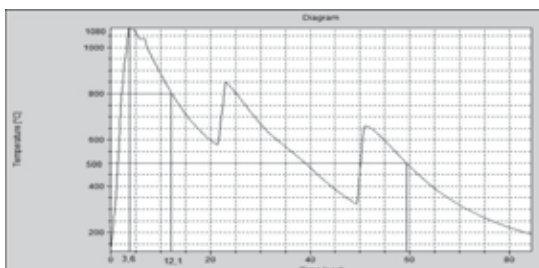
Temperatura cyklu  $T_{max} = 400^{\circ}\text{C}$



Temperatura cyklu  $T_{max} = 900^{\circ}\text{C}$



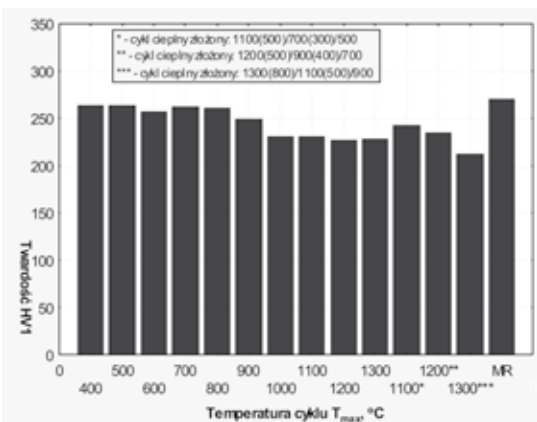
Temperatura cyklu  $T_{max} = 1200^{\circ}\text{C}$



Temperatura cyklu złożonego  $T_{max} = 1100^{\circ}\text{C}$

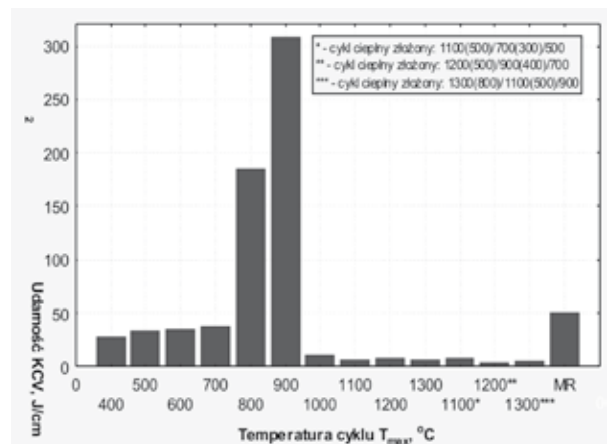


**Rys. 3.** Przebiegi wybranych cykli cieplnych symulowanej SWC stali S700MC wraz z termogramami  
**Fig. 3.** Waveforms of selected simulated HAZ thermal cycles in S700MC steel with thermal image



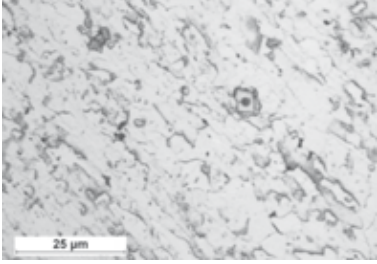
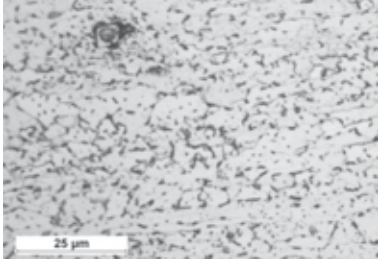
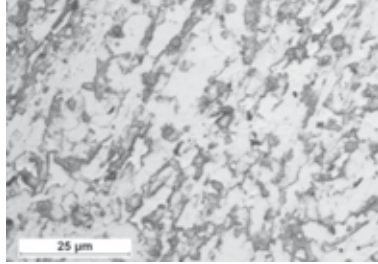
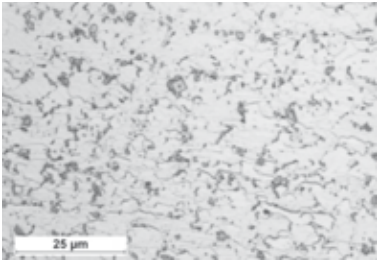
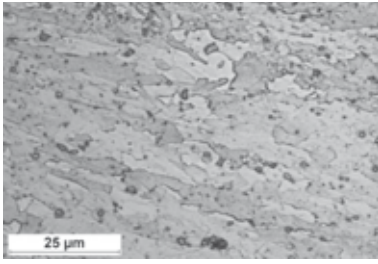
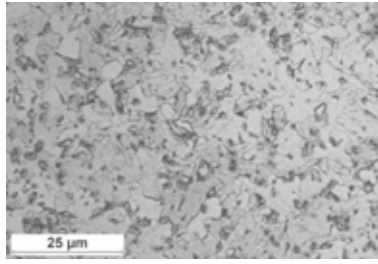
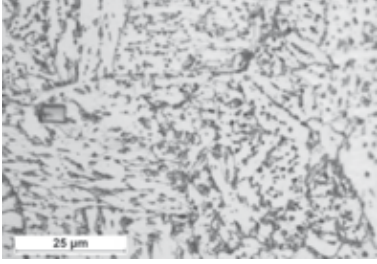
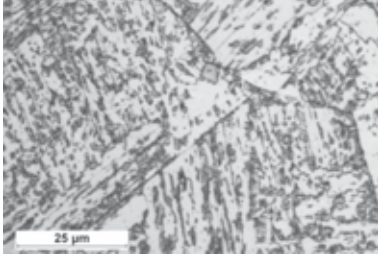
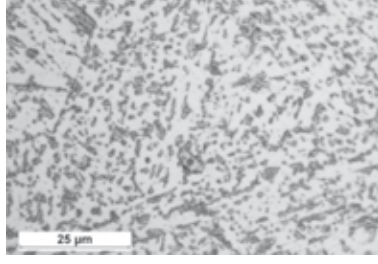
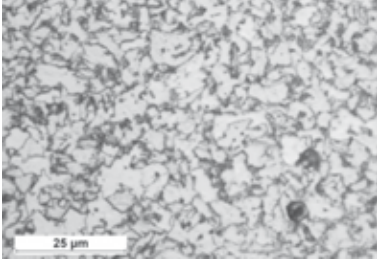
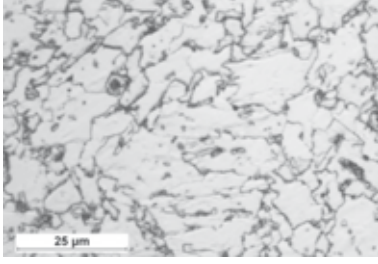
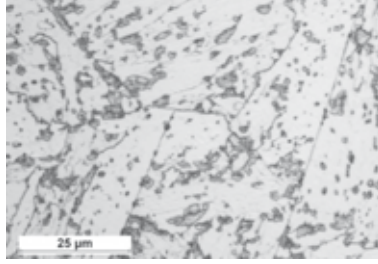
**Rys. 4.** Wyniki pomiarów twardości HV1 symulowanych obszarów SWC stali S700MC

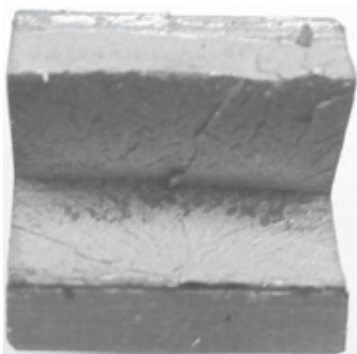
**Fig. 4.** Results of measurements of hardness HV1 simulated HAZ areas of S700MC steel



**Rys. 5.** Udarność symulowanej SWC stali S700MC w temp. -30°C  
**Fig. 5.** Impact strength steel S700MC simulated HAZ at -30°C

**Tablica IV.** Mikrostruktura obszarów SWC stali S700MC w funkcji temperatury  $T_{max}$   
**Table IV.** Microstructure HAZ areas S700MC steel as a function of temperature  $T_{max}$

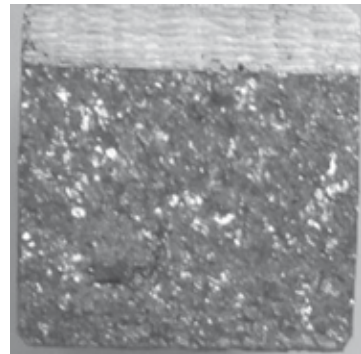
		
$T_{max} = 400^{\circ}\text{C}; 264 \text{ HV1}$	$T_{max} = 500^{\circ}\text{C}; 263 \text{ HV1}$	$T_{max} = 600^{\circ}\text{C}; 257 \text{ HV1}$
		
$T_{max} = 700^{\circ}\text{C}; 262 \text{ HV1}$	$T_{max} = 800^{\circ}\text{C}; 261 \text{ HV1}$	$T_{max} = 900^{\circ}\text{C}; 249 \text{ HV1}$
		
$T_{max} = 1000^{\circ}\text{C}; 231 \text{ HV1}$	$T_{max} = 1100^{\circ}\text{C}; 230 \text{ HV1}$	$T_{max} = 1200^{\circ}\text{C}; 226 \text{ HV1}$
		
$T_{max} = 1100^{\circ}\text{C}; \text{cykl złożony}$ 243 HV1	$T_{max} = 1200^{\circ}\text{C}; \text{cykl złożony}$ 234 HV1	$T_{max} = 1300^{\circ}\text{C}; \text{cykl złożony}$ 212 HV1



Przełom mieszany  $T_{max} = 500^{\circ}\text{C}$

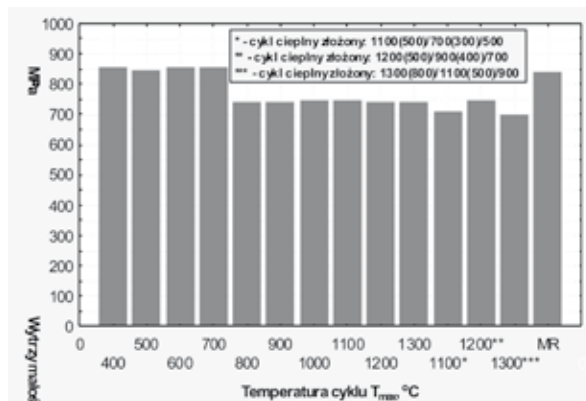


Przełom plastyczny  $T_{max} = 900^{\circ}\text{C}$

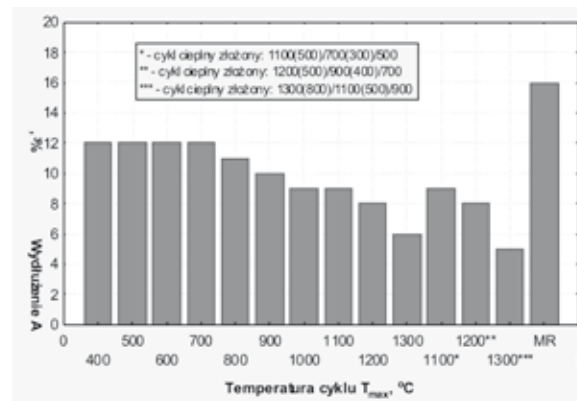


Przełom kruchy  $T_{max} = 1200^{\circ}\text{C}$

**Rys. 6.** Przełomy SWC stali S700MC po próbie udarności w temperaturze  $-30^{\circ}\text{C}$   
**Fig. 6.** View of S700MC steel HAZ fracture after an impact test at  $-30^{\circ}\text{C}$



Rys. 7. Wytrzymałość na rozciąganie symulowanej SWC stali S700MC  
Fig. 7. Tensile strength of steel S700MC simulated HAZ



Rys. 8. Wydłużenie symulowanej SWC stali S700MC  
Fig. 8. Relative elongation of the simulated HAZ steel S700MC

## Podsumowanie

Stal S700MC charakteryzuje się silnie zdefektowaną strukturą bainityczno-ferrytyczną. Bardzo niska zawartość węgla (0,05%), który w dużej części został związany przez Ti oraz Nb, skutkuje zmniejszeniem jego udziału w umocnieniu stali i ogranicza jego oddziaływanie w przemianach fazowych i strukturalnych. W obszarze wtopienia i SWC zaobserwowano obecność wydzielen o wielkości od kilkunastu do kilkudziesięciu  $\mu\text{m}$ , które nie biorą udziału w umocnieniu stali i ograniczeniu rozrostu ziarna, tylko stanowią karb oraz obniżają właściwości wytrzymałościowe i plastyczne złączy spawanych. Istotny wpływ na właściwości złączy spawanych stali obrabianych termomechanicznie wywiera obszar SWC, zwłaszcza ten nagrany do bardzo wysokiej temperatury (1250÷1400°C). Badania symulowanych obszarów SWC, nagrzewanych do różnych maksymalnych temperatur, wykazały znaczne ich zróżnicowanie pod względem właściwości wytrzymałościowych i plastycznych. Właściwości wytrzymałościowe po przekroczeniu temperatury cyklu cieplnego o maksymalnej temperaturze 600°C maleją w stosunku do materiału rodzimego, co związane jest przede wszystkim z rozrostem ziarna. Właściwości plastyczne symulowanych SWC (zwłaszcza

udarność) zależą od trwałości faz umacniających, ich dyspersji oraz od procesów starzeniowych. Obszary SWC nagrzewane od 400 do 700°C charakteryzują się udarnością niższą niż udarność materiału rodzimego, co należy wiązać prawdopodobnie z procesami starzeniowymi, dyfuzją atomów węgla i azotu na bliskie odległości do jąder dyslokacji i ich unieruchomieniem. Symulowane obszary SWC nagrzane do temperatury 800°C i 900°C wykazują bardzo wysoką udarność, sięgającą 300 J/cm<sup>2</sup>. Tak duży wzrost udarności związany jest z przejściem składników umacniających do osnowy i w konsekwencji zanikiem umocnienia wydzieleniowego oraz procesami rekrytalizacji. W wysokotemperaturowym obszarze SWC gwałtowny spadek udarności do kilku J/cm<sup>2</sup> związany jest ze wzrostem rozpuszczonych mikrododatku umacniających w osnowie i ich niekontrolowanym wydzieleniem w czasie chłodzenia. Uzyskane wyniki badań wykazały, że przemiana fazowa austenitu podczas chłodzenia nie odgrywa dominującej roli w zapewnieniu odpowiednich właściwości wytrzymałościowych i plastycznych złączy spawanych stali obrabianej termomechanicznie S700MC.

## Literatura

- [1] Węgrzyn J.: Fizyka i metalurgia spawania, Politechnika Śląska, Gliwice 1990.
- [2] Brózda J., Pilarczyk J., Zeman M.: Spawalnicze wykresy przemian austenitu CTPc-S, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1983.
- [3] Poradnik inżyniera, Spawalnictwo, t. 1 (pod red. J. Pilarczyka) WNT, Warszawa 2003.
- [4] Górka J.: Wpływ temperatury podgrzewania wstępnego na właściwości i strukturę złączy spawanych stali obrabianej termomechanicznie S700MC, XIX Naukowo-Techniczna Krajowa Konferencja Spawalnicza, Postęp, innowacje i wymagania jakościowe procesów spawania, Międzyzdroje 04-06.06. 2013, s. 59-70.
- [5] Brózda J.: Nowoczesne stale konstrukcyjne i ich spawalność. Wydawnictwo Instytutu Spawalnictwa, Gliwice 2009.
- [6] Tasak E., Ziewiec A.: Spawalność materiałów konstrukcyjnych, t. 1, Spawalność stali, Kraków 2009.
- [7] Yurioka M.: TMCP steel and their welding, Welding in the World, vol. 35, 6/1995, s. 375-390.
- [8] Meester B.: The weldability of modern structural TMCP steel. ISIJ International, vol. 37, 1997, No. 6, s. 537-551.
- [9] Górka J.: Właściwości i struktura złączy spawanych stali obrabianej termomechanicznie o wysokiej granicy plastyczności, Monografia habilitacyjna, Gliwice 2013.