

# Obróbka cieplna zgrzewanych wybuchowo bimetalu ze stali austenitycznych

The heat treatment process of the bimetallic joint made by explosive cladding method

## Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań bimetalu ze stali austenitycznych ASME SB-625- ASME SA-240 316Ti uzyskanego przez zgrzewanie wybuchowe. Bimetal poddano wyżarzaniu w temperaturze 610°C przez 90 min i w temperaturze 910°C przez 30 min. Dla otrzymanych złączy wykonano badania właściwości mechanicznych, obejmujące próby ścinania, zginania, określenie wytrzymałości na rozciąganie, badanie udarność, badania struktury oraz pomiary mikrotwardości. Na podstawie tych badań oceniono jakość uzyskanego połączenia, a także określono wpływ obróbki cieplnej na strukturę i właściwości złącza. Stwierdzono, że w wyniku zgrzewania następuje umocnienie w strefie złącza, a zastosowana obróbka cieplna nie spowodowała spadku twardości w strefie połączenia, w związku z czym przeprowadzenie tego typu zabiegów wydaje się niecelowe.

**Słowa kluczowe:** złącza różnorodne, zgrzewanie wybuchowe

## Abstract

Presented results of test of the bimetallic joint: austenitic stainless steel ASMESB-625+austenitic stainless steel ASMESA-240 316Ti, produced by explosive cladding method. Manufactured joint was stress relief annealed at 610°C with holding time of 90 min as well as normalized at 910°C with holding time of 30 min. Joints were tested in aim to check its mechanical properties, including: shear test, bend test, tensile test, impact tests, microstructure and micro-hardness measurements. Basis on performed tests, evaluated quality of manufactured joint as well as determined influence of heat treatment for its structure and properties. Concluded that due to the influence of explosive cladding, follow hardening of bond zone. The heat treatment does not reduce hardness of the bond zone, therefore process of heat treatment is needless for that joint.

**Keywords:** dissimilar joints, explosive welding

## Wstęp

Proces zgrzewania wybuchowego, związany z wytwarzaniem dużej ilości energii, powoduje znaczne odkształcenie łączonych materiałów i ich umocnienie w wyniku zgniotu, szczególnie w obszarze złącza. Umocnienie to powoduje wzrost właściwości wytrzymałościowych i spadek właściwości plastycznych materiału. Wzrastają także naprężenia i twardość w strefie złącza. Negatywne efekty procesu zgrzewania można

usunąć, stosując zabiegi obróbki cieplnej, głównie wyżarzanie odprężające, rekrystalizujące i normalizujące.

W przypadku bimetalu, w których przynajmniej jeden z łączonych elementów jest wykonany ze stali austenitycznej, parametry obróbki cieplnej muszą być tak dobrane, aby ograniczyć ryzyko wystąpienia w materiale korozji międzykrystalicznej. Podczas obróbki w temperaturze ok. 500°C zachodzi wydzielanie węglików chromu w postaci siatki na granicach ziaren. W tej temperaturze szybkość dyfuzji chromu jest znacznie mniejsza niż szybkość dyfuzji węgla, wskutek czego węgiel

Dr inż. Anna Pocica, inż. Michał Najwer – Politechnika Opolska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: a.pocica@po.opole.pl

dyfunduje z całego obszaru ziarna, a chrom jedynie z obszarów przygranicznych. Lokalne zmniejszenie stężenia chromu powoduje gwałtowny wzrost potencjału Fladego w tych obszarach i jego uwrażliwienie na działanie korozji elektrochemicznej przebiegającej wzdłuż granic ziaren [4].

Wytrzymanie stali przez dłuższy czas w temperaturze powyżej 600°C powoduje z kolei wydzielanie w stalach fazy  $\sigma$ . Faza ta, składająca się w 58% z Cr, powoduje zdecydowany wzrost twardości i kruchości stali, a także obniża jej odporność na korozję.

Zastosowanie wyższej temperatury obróbki (ok. 650°C), w której wzrasta szybkość dyfuzji chromu, zapobiega powstawaniu węglików, a tym samym przeciwdziała korozji międzykrystalicznej. Podobnie wpływa wydłużenie czasu wygrzewania stali, nawet w temperaturze zbliżonej do 500°C [4].

## Badania własne

Badaniom poddano plater ze stali ASME SB-625 oraz ASME SA-240 316Ti, których skład chemiczny i właściwości mechaniczne przedstawiono w tablicach I i II.

Z plateru wycięto trzy płyty próbne, które oznaczono: P385/A, P385/B oraz P385/C. Próbkę P385/A nie poddano obróbce cieplnej, próbka P385/B została poddana wyżarzaniu odprężającemu, a dla próbki P385/C zastosowano obróbkę o parametrach wyżarzania normalizującego. Dla próbki P385/A przeprowadzono badania właściwości mechanicznych oraz struktury pozwalające określić spełnienie wymagań normy przez plater.

**Tablica I.** Zawartość pierwiastków w stali ASME SB-625 i ASME SA-240316Ti wg PN-EN 10088-1:1998 i PN-EN 10088-1:1998; % wag. [1÷4]  
**Table I.** Chemical composition of ASME SB-625 and ASME SA-240316Ti acc. to PN-EN 10088-1:1998 and PN-EN 10088-1:1998, wt% [1÷4]

Stal	C	Cu	Mo	Cr	Ni	N	Mn	Si
ASME SB-625	0,006	1,26	6,38	26,83	31,65	0,19	–	–
Zawartość wg PN-EN 10088-1:1998	< 0,035	0,5÷4,0	5÷7	20÷26	18÷26	0,1÷0,3	–	–
ASME SA-240316Ti	0,024	–	2,18	17,11	10,74	–	1,8	0,51
Zawartość wg PN-EN 10088-1:1998	< 0,08	–	2,0÷2,5	16,5 ÷18,5	10,5 ÷13,5	–	< 2	< 1

**Tablica II.** Minimalne właściwości mechaniczne stali ASME SB-625 i ASME SA-240316Ti [2, 3]

**Table II.** Minimum mechanical properties of ASME SB-625 and ASME SA-240316Ti steels [2, 3]

Stal	$R_{p0,2}$ MPa	$R_m$ MPa	A %	Twardość HV0,1
ASME SB-625	276	650	40	272
ASME SA-240316Ti	200	500 ÷700	40	248

W próbie rozciągania gotowego plateru stosuje się dwa rodzaje próbek: z warstwą platerującą i z usuniętą warstwą platerującą.

Wytrzymałość na rozciąganie po usunięciu materiału nakładanego z plateru powinna być zbliżona do wytrzymałości materiału podstawowego. Minimalną wytrzymałość na rozciąganie, którą musi mieć badana próbka, można określić z zależności [7]:

$$R_m = \frac{R_{mT} \cdot h_T + R_{mM} \cdot h_M}{h_T + h_M}$$

gdzie:

$R_{mT}$  – wytrzymałość na rozciąganie materiału nakładanego,  
 $R_{mM}$  – wytrzymałość na rozciąganie materiału podstawowego,  
 $h_T$  – grubość materiału nakładanego,  
 $h_M$  – grubość materiału podstawowego.

Oprócz opisanych badań wytrzymałościowych, dla plateru wykonuje się również próby ścinania i zginania, a dodatkowo często wykonywana jest również próba udarności. W przypadku próby ścinania norma ASTM A-264-61T określa, że wytrzymałość na ścinanie powinna wynosić ok. 137 MPa. W próbie zginania platerów obserwuje się czasem pojawienie rozwarstwień. Wystąpienie rozwarstwień w strefie połączenia dyskwalifikuje plater. Próba udarności jest wykonana tylko na materiale podstawowym, po uprzednim sfrezowaniu materiału nakładanego, najczęściej na próbkach standardowych, lecz norma dopuszcza badanie na próbkach połówkowych i takie próbki zastosowano do badań.

Blacha, prawidłowo wykonana metodą zgrzewania wybuchowego, właściwościami mechanicznymi powinna odpowiadać materiałowi podstawowemu, a odpornością na korozję materiałowi nakładanemu [1, 5].

## Obróbka cieplna platerów

Celem obróbki cieplnej było określenie zmian zachodzących w materiale w wyniku oddziaływania temperatury. Ma to szczególne znaczenie dla układów pracujących w podwyższonej temperaturze. Próbkę nagrzewano w piecu komorowym FCF-V120HC firmy CZYLOK, po czym chłodzono je w powietrzu. Parametry obróbki przedstawiono w tablicy III.

**Tablica III.** Parametry obróbki cieplnej  
**Table III.** Heat treatment parameters

Próbka	Nagrzewanie		Wyrzewanie		Chłodzenie		
	Temp. początkowa °C	Prędkość °C/h	Temp. °C	Czas min	Prędkość °C/h	Temp. °C	Od temperatury 400°C chłodzone w powietrzu
P385B	300	100	610	90	100	400	
P385C	400	100	910	30	Chłodzenie w powietrzu		

Zaproponowane zakresy temperatury odpowiadają procesom odprężania stali, a także wyżarzania normalizującego.

### Badania właściwości mechanicznych

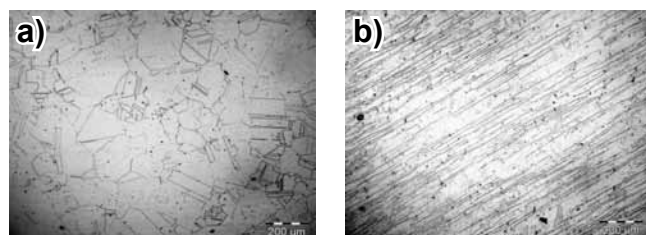
Do prób rozciągania, ścinania oraz zginania wykorzystana została maszyna wytrzymałościowa z napędem hydraulicznym i zmodyfikowanym torem pomiaru siły (zapisem cyfrowym przebiegu). Badania udarności zostały wykonane na młocie Charpy'ego. Dla każdej płyty próbnej zostały wykonane trzy próbki Charpy V. Wyniki badań przedstawiono w tablicy IV.

**Tablica IV.** Wyniki badań właściwości mechanicznych platerów  
**Table IV.** Results of mechanical properties of platters testing

Próbka	R <sub>s</sub> MPa	Praca łamania J	Kąt zginania	R <sub>02</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	A %
P385A	684	56,2	180°	573	692	32,5
P385B	703	33,6	180°	435	620	40
P385C	755	12,8	20°	416	616	34,7

### Badania struktury poddanej obróbce cieplnej

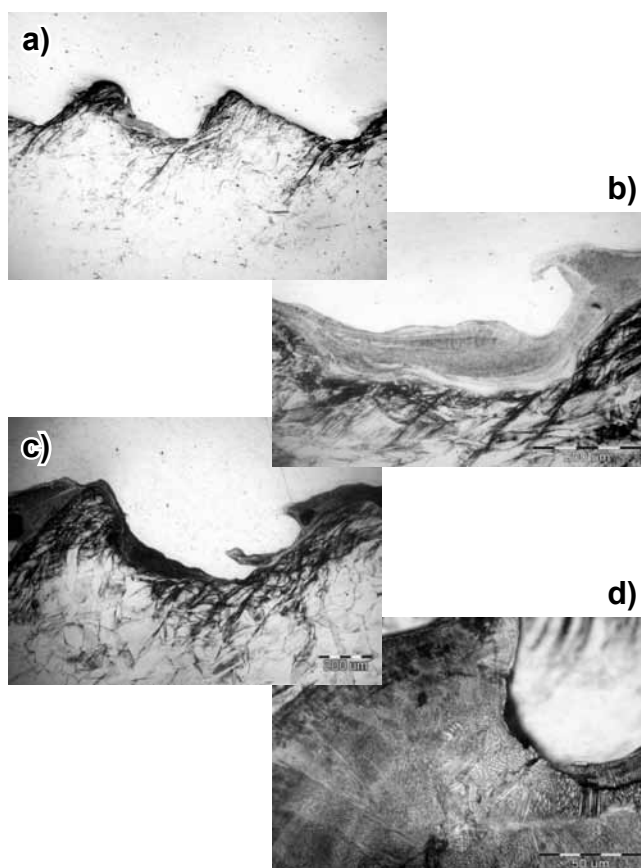
Badania struktury przeprowadzono dla materiałów wyjściowych, a także dla platerów przed obróbką i po obróbce cieplnej. Próbki do badań szlifowano, polewowano, a następnie trawiono elektrolitycznie. Obserwacji struktury dokonano na mikroskopie optycznym Olympus IX70, stosując powiększenia od 50x do 500x. Zaobserwowane mikrostruktury przedstawiono na rysunkach 1÷4.



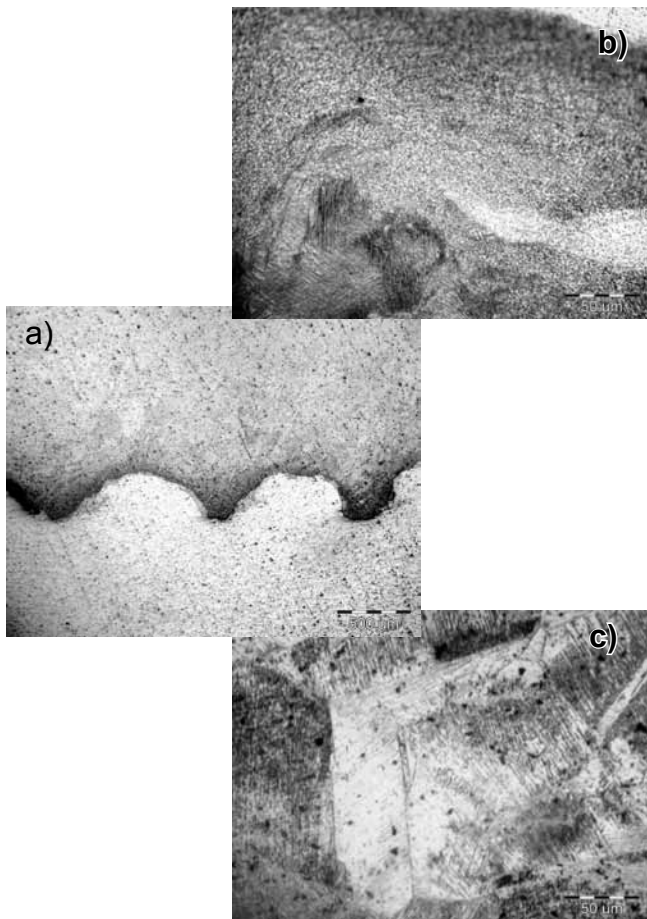
**Rys. 1.** Mikrostruktura materiału nakładanego ASME SB-625 (a) i podstawowego ASME SA-240316Ti (b). Pow. 200x  
**Fig. 1.** Microstructure of cladded metal ASME SB-625 and base metal ASME SA-240316Ti (b). Magn. 200x



**Rys. 2.** Struktura złącza przed obróbką cieplną. Pow. 50x  
**Fig. 2.** Structure of joint before heat treatment. Magn. 50x



**Rys. 3.** Mikrostruktura plateru po wyżarzaniu odprężającym: a) widok ogólny, pow. 50x; b) warstwa przetopiona, pow. 200x, c) pasma ścinania, pow. 200x, d) struktura fali, pow. 500x  
**Fig. 3.** Microstructure of platter after stress relief annealing: a) general view, magn. 50x; b) remelted layer, magn. 200x; c) ferrite banding, magn. 200x, d) wave, magn. 500x



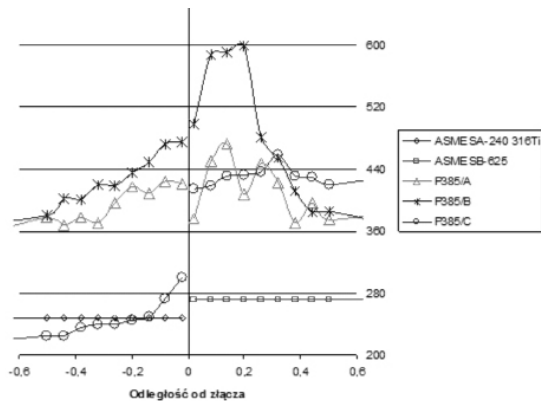
**Rys. 4.** Struktura po wyżarzaniu normalizującym: a) złącze, b) fala, c) materiał nakładany

**Fig. 4.** Structure after normalizing: a) joint, b) wave, c) clad metal

#### Badania mikrotwardości przed obróbką cieplną i po obróbce

Badania mikrotwardości przeprowadzono na twardościomierzu Leco MHT Series 200 wzdłuż linii prostopadłych do linii złącza. Dla każdej próbki pomiary prowadzono w trzech liniach.

Pomiar wykonano przy powiększeniu 50x, obciążenie pomiarowe wynosiło 100 G. Pierwszy odcisk został wykonany w odległości 0,02 mm od linii złącza, kolejne 8 co 0,06 mm, a następne co 0,5 mm. Wyniki pomiarów twardości w skali Vickersa przedstawiono na rysunku 5.



**Rys. 5.** Wykres zmian mikrotwardości dla badanych próbek  
**Fig. 5.** Microhardness distribution for tested samples

## Analiza wyników badań

W wyniku procesu zgrzewania wybuchowego uzyskano złącze stali austenitycznych ASME SB-625 oraz ASME SA-240 316Ti o charakterystycznej budowie falistej.

Proces zgrzewania spowodował umocnienie obu materiałów w strefie złącza. W materiale podstawowym ASME SA-240 316Ti twardość w strefie złącza wzrosła o 120 HV, natomiast w materiale nakładanym ASME SB-625 o ok. 100 HV. W przypadku płyty podstawowej bardzo wysoką twardość obserwuje się jeszcze w odległości 0,3 mm od linii złącza. Natomiast w płycie nakładanej występuje wzrost twardości w odległości 0,2 mm do 0,4 mm od linii złącza (rys. 5). Umocnienie to jest spowodowane odkształceniem wywołanym procesem zgrzewania. Na wzrost umocnienia może również wpływać występowanie w zawinięciu fali strefy przetopionej o znacznej twardości.

Zaproponowana dla plateru obróbka cieplna polegająca na nagraniu stali do temperatury 610°C i wytrzymaniu w tej temperaturze przez 90 min powoduje wzrost umocnienia, który jest szczególnie znaczący dla materiału nakładanego, dla którego twardość w strefie złącza wynosi 500 HV. Jednocześnie maleją właściwości wytrzymałościowe plateru, a także udarność materiału podstawowego, mierzona zgodnie z PN-EN 13445 (tabl. IV). Efekty umocnienia związane z odkształceniem plastycznym widoczne są również w strukturze bimetalu. W linii złącza obserwuje się występowanie pasm ścinania, a także linie poślizgu wewnątrz ziaren (rys. 3a). Znaczący wzrost umocnienia po odprężaniu może być również spowodowany pojawieniem się w strukturze kruchej i bardzo twardej wysokochromowej fazy  $\sigma$ .

Nagrzanie stali do temperatury 910°C powoduje spadek twardości w pobliżu linii złącza. Twardość ta wynosi 415 HV i jest zdecydowanie niższa niż twardość plateru po odprężaniu, a także niższa niż plateru w stanie wyjściowym. Nie obserwuje się znaczących zmian właściwości wytrzymałościowych w porównaniu z właściwościami plateru po odprężeniu (tabl. IV), chociaż zdecydowanie spada udarność. Może to być spowodowane tym, że w trakcie przygotowywania próbek do badań nie do końca usunięto materiał nakładany, pozostawiając strefę umocnioną. W związku z tym należałoby ponownie przeprowadzić badania udarności próbek, gdyż spadek twardości złącza sugeruje, że udarność powinna być wyższa.

W strukturze złącza po obróbce cieplnej obserwuje się warstwy przetopione, wpływające na jego właściwości. Obróbka cieplna spowodowała zanik pasm ścinania, natomiast w obrębie ziaren pozostały pasma poślizgu (rys. 4c). W zawinięciu fali obserwuje się skoagulowane wydzielenia, prawdopodobnie węglików chromu (rys. 4b), co może być przyczyną zmniejszenia umocnienia plateru.

## Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

- Wyżarzanie odprężające bimetalu ASME SB-625 oraz ASME SA-240 316Ti powoduje wzrost umocnienia plateru, który prawdopodobnie jest związany z wydzieleniem w obszarze złącza wysokochromowej fazy  $\sigma$ .
- Złącze po wyżarzaniu normalizującym ma zdecydowanie mniejszą twardość niż złącze przed obróbką cieplną, jednak wyniki badań udarność wskazują na konieczność dalszych badań celem weryfikacji i wyjaśnienia zjawisk zachodzących w platerach w wyniku obróbki cieplnej.
- Zastosowanie wyżarzania odprężającego o przyjętych parametrach dla badanych platerów jest niecelowe.
- Należy rozważyć możliwość normalizacji złącza z szybkim przekroczeniem zakresu temperatur, w których wydziela się faza  $\sigma$ .

## Literatura

- [1] Blicharski M.: Inżynieria materiałowa: Stal. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 2009.
- [2] Certyfikat nr 310042784-1 z dnia 03.05.2012
- [3] Certyfikat nr 94394 z dnia 20.09.2011
- [4] Dobrzański L.: Zasady doboru materiałów inżynierskich z kartami charakterystyk. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
- [5] Dyja H., Maranda A., Trąbiński R.: Zastosowanie technologii wybuchowych w inżynierii materiałowej. Politechnika Częstochowska – Wydawnictwo. Częstochowa 2001.
- [6] Pocica A., Bański R., Waindok P., Szulc Z., Gałka A.: Wpływ czasu obróbki cieplnej na właściwości bimetalu tytan-stal, XVI Międzynarodowa Konferencja „Spawanie w energetyce”. Opole-Jarnołtówek 23-25 kwietnia 2008, Opole 2008.
- [7] Walczak W.: Zgrzewanie wybuchowe metali i jego zastosowanie. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1989.

## Przegląd Spawalnictwa Welding Technology Review Open Access Library

Przegląd Spawalnictwa uruchomił możliwość wolnego dostępu do pełnych treści artykułów w ramach Open Access Library. Artykuły w języku angielskim w formacie PDF zamieszczane są na stronie internetowej redakcji: [www.pspaw.ps.pl](http://www.pspaw.ps.pl).

Autorów zainteresowanych publikacją w Open Access Library prosimy o przesyłanie artykułów w języku polskim i angielskim. W miesięczniku nastąpi publikacja w języku polskim, a tekst w języku angielskim zostanie zamieszczony na stronie internetowej.