

# Wpływ obróbki cieplnej na mikrostrukturę i odporność korozyjną bimetalu stal 904L – nikiel N02201 wytworzonego zgrzewaniem wybuchowym

Influence of heat treatment on microstructure and corrosion resistance of the bimetal steel 904L – nickel N02201 produced by explosive welding

## Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań bimetalu 904L – N02201 połączonego metodą zgrzewania wybuchowego. Plater wykonano technologią zgrzewania wybuchowego, a następnie przeprowadzono wstępną obróbkę cieplną - wyżarzanie odprężające. Określono mikrostruktury złącza po wstępnej obróbce cieplnej, a zarazem w celu sprawdzenia odporności złącza na korozję, przeprowadzono dodatkową obróbkę cieplną. Kolejno, przy użyciu mikroskopu optycznego oraz skaningowego, wykonano badanie mikrostruktury po obróbce cieplnej. Przeprowadzono pomiary wielkości elektrycznych podczas korozji swobodnej w badaniach potencjodynamicznych, umożliwiające ocenę odporności na korozję.

**Słowa kluczowe:** zgrzewanie wybuchowe, obróbka cieplna, odporność korozyjna

## Abstract

This paper presents the results research of bimetal 904L – N02201 connected using explosive welding method. Plater was performed using explosive welding technology, heat treatment was carried out pre-stress relief. The joint microstructure was defined after initial heat treatment and also to verify the corrosion resistance of the joint additional heat treatment was carried out. Consecutively, using an optical and scanning microscope, examination of the microstructure after heat treatment were performed. The electrical measurements were examined during free corrosion in the potentiodynamic studies enabling the evaluation of corrosion resistance.

**Keywords:** explosive welding, heat treatment, corrosion resistance

## Wstęp

Zgrzewanie wybuchowe jest to proces technologiczny polegający na połączeniu dwóch lub więcej elementów metalowych za pomocą energii wyzwolonej się przy detonacji ładunku wybuchowego [1].

Uzyskane połączenia mogą mieć charakter adhezyjny, mechaniczny bądź dyfuzyjny. W przypadku połączeń mechaniczno – adhezyjnych otrzymane połączenie cechuje się wysoką jakością, natomiast połączenia dyfuzyjne powodują pogorszenie właściwości materiałów i odporności korozyjnej [2,3]. Wysokoenergetyczny proces łączenia wprowadza również do struktury wielowarstwowego materiału niekorzystne naprężenia i umocnienie, co negatywnie wpływa na właściwości użytkowe i ogranicza możliwości jego dalszego

kształtowania metodami przeróbki plastycznej, czy obróbki ubytkowej [1]. W celu poprawy właściwości wytrzymałościowych normy PN-EN 13455-2 przewidują wykonanie obróbki cieplnej [4]. W przypadku kompozytów warstwowych wymagane jest, aby temperatura obróbki cieplnej była niższa od temperatury przejścia w stan ciekły warstwy złącza o najniższej temperaturze topnienia.

Analizowany w tym artykule bimetal ma znaleźć swoje zastosowanie jako materiał w przemyśle chemicznym i zbrojeniowym. Warunki pracy elementów wykonanych z opisywanego bimetalu wymagają szczelnego połączenia, wysokiej odporności na korozję, a także jak najlepszych właściwości mechanicznych, dlatego przeprowadzona została

**Mgr inż. Urszula Sobczak** – Wojskowa Akademia Techniczna Warszawa; **mgr inż. Michał Najwer, mgr inż. Grzegorz Kwiatkowski** – Politechnika Opolska, Zakład Technologii Wysokoenergetycznych EXPLOMET.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: urszula.sobczak@wat.edu.pl

obróbka cieplna mająca na celu usunięcie skutków zgniotu, uzyskanie odpowiedniej mikrostruktury oraz odporności na korozję [5]. W tym celu przeprowadzono analizę wpływu obróbki cieplnej na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne plateru stal – stop niklu.

## Badania własne

### Materiał do badań

W ramach realizowanych badań wytworzono metodą zgrzewania wybuchowego bimetal, w którego skład wchodziła stal austenityczna 904L stanowiąca blachę podstawową o grubości 25 mm oraz stop niklu N02201 będący blachą nakładaną o grubości 6 mm. Składy chemiczne łączonych materiałów zostały przedstawione w tablicach I i II. Wymiary końcowe łączonych blach wynosiły: (25+6)×2000×5000.

Do analizy mikrostruktury oraz odporności na korozję materiał poddano początkowo wyżarzaniu odprężającemu w temperaturze 540 °C przez 90 min. Następnie badany materiał poddano dwuetapowej obróbce cieplnej. Etap pierwszy stanowiło przesycanie, próbki (1-4) o wymiarach (25+6)×30×20 zostały wygrzane w temperaturze 1050 °C przez 1h. Próbki chłodzone były w wodzie. Etap drugi stanowiło wygrzewanie próbek (2-4) w temperaturze 550 °C przez 1 (próbka 2), 3 (próbka 3) oraz 5 (próbka 4) godzin. Próbki chłodzone były na powietrzu.

### Badanie mikrostruktury po obróbce cieplnej

Zgłady metalograficzne trawiono dwuetapowo, najpierw wykonano trawienie stali austenitycznej odczynnikiem zawierającym 100 ml H<sub>2</sub>O + 100 ml HCl +10 ml HNO<sub>3</sub>, który podgrzano do temperatury 50 °C. Następnie wytrawiono nikiel odczynnikiem zawierającym 4 g CuSO<sub>4</sub> + 20 ml HCl + 20 ml C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH. Mikrostruktury obserwowano na mikroskopie optycznym i skaningowym. Na rysunku 1 przedstawiono mikrostrukturę złącza platerowanego po przesycaniu w temperaturze 1050 °C przez 1 godzinę.

Na rysunku 2 przedstawiono przykłady mikrostruktur ujawnionych na wytrawionym zgładzie metalograficznym w obszarze złącza oraz w materiałach zgrzewanych.



Rys. 1. Mikrostruktura złącza platerowanego  
Fig. 1. The microstructure of the joint

Tablica I. Skład chemiczny badanej stali 904L [w % wag.]

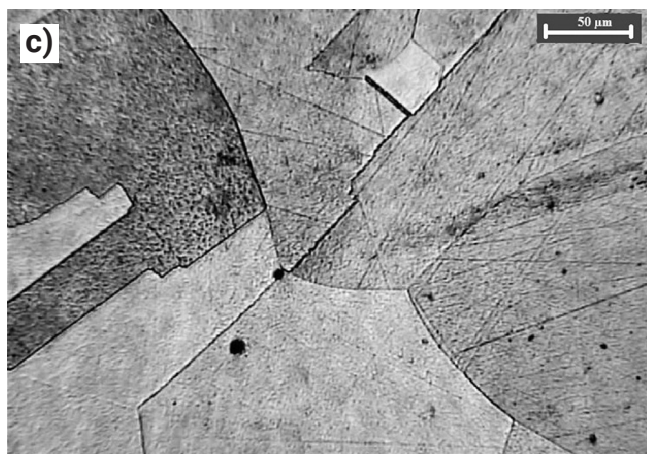
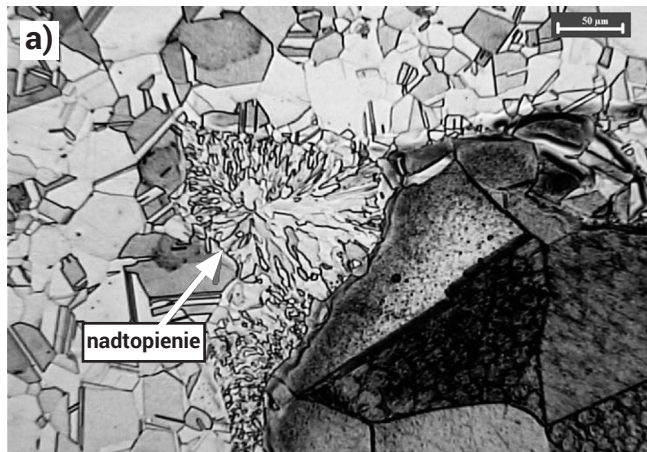
Table I. Chemical composition of investigated steel 904L [in % wt.]

Skład Nr	C	S	Ni	Mn	Si	Ti	P	Cr	Cu	Mo	Nb	N
904L	0,01	0,0005	24,235	1,535	0,1836	0,013	0,0162	19,69	1,3098	4,0054	0,008	0,057

Tablica II. Skład chemiczny stopu niklu N02201 [w % wag.]

Table II. Chemical composition of investigated nickel alloy N02201 [in % wt.]

Skład Nr	C	S	Ni	Mn	Si	Ti	Cu	Fe	Mg
N02201	0,01	<0,0002	99,7	0,09	0,06	0,02	<0,01	0,03	0,02



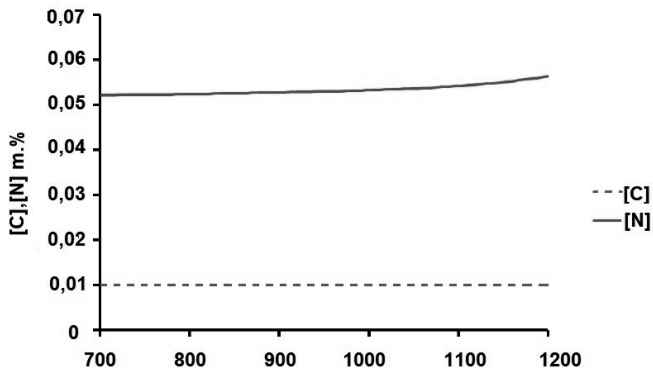
Rys. 2. Mikrostruktury próbki po przesycaniu (1050°/1h/H<sub>2</sub>O): a) obszar złącza, b) stal 904L, c) nikiel N02201

Fig. 2. Microstructure of the sample after annealing (1050°/1h/H<sub>2</sub>O): a) the area of joint, b) steel 904L, c) nickel

Wielkość ziarna niklu (rys. 2c) jest wielokrotnie większa od wielkości ziarna stali 904L (rys. 2b). W obu materiałach występują bliźniaki wyżarzania. W niektórych obszarach obserwuje się efekty nadtopienia, charakteryzujące się budową drobnoziarnistą (rys. 2a).

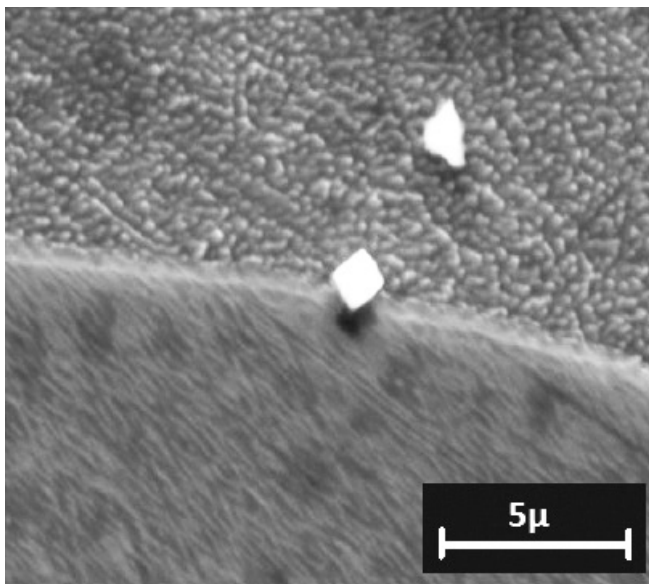
### Analiza mikrostruktury za pomocą SEM

Za pomocą programu komputerowego CarbNit i mikroskopu skaningowego Hitachi 3500 N, wykonano analizę termodynamiczną wydzielen w zgrzewanym materiale. Podczas przeprowadzonej analizy węglikoazotków wykazano, że węgiel i azot nie został w całości związany (rys. 3). Zauważono, że zawartość węgla praktycznie się nie zmienia a wraz z obniżeniem temperatury maleje ilość azotu rozpuszczonego w stali.



Rys. 3. Skład chemiczny austenitu  
Fig. 3. Chemical composition of the austenite

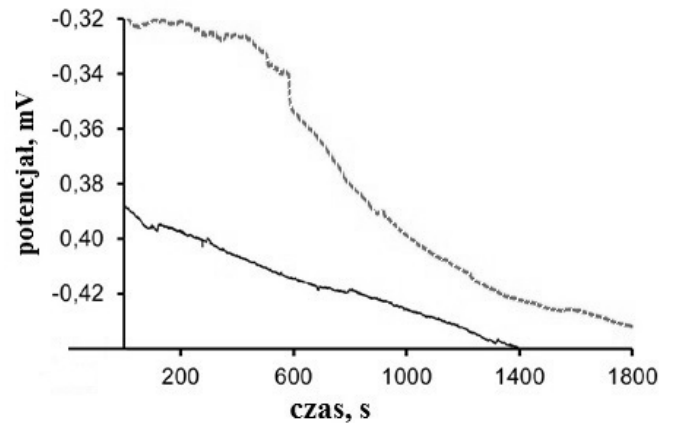
Potwierdzeniem tych obliczeń są wydzielenia zaobserwowane w badanym materiale (rys. 4).



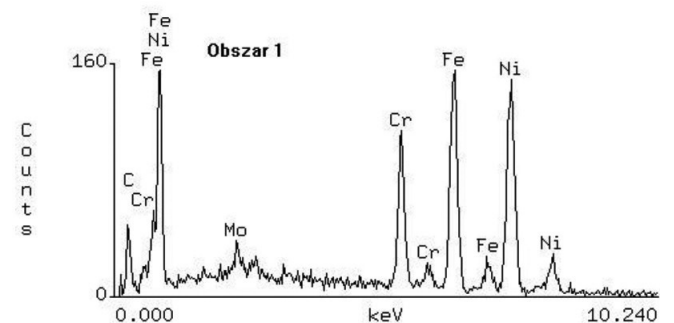
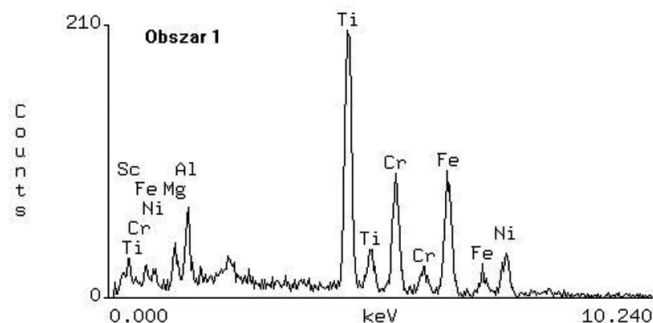
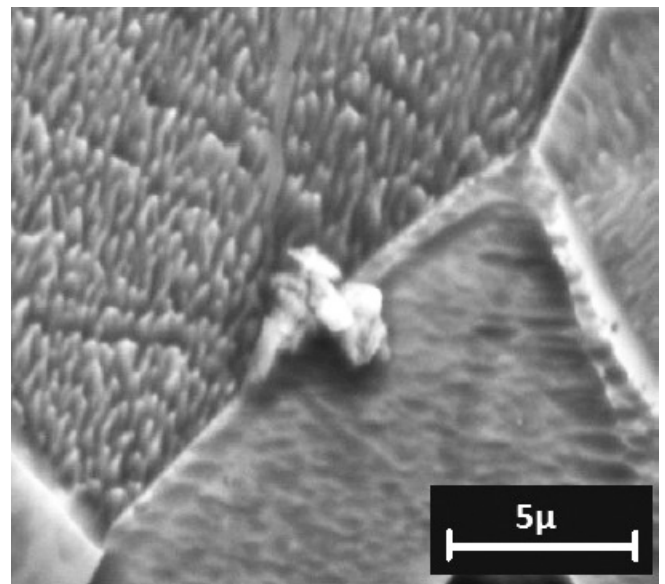
Wewnątrz ziarn stwierdzono występowanie azotków i węglików. Po wykonaniu analizy składu chemicznego stwierdzono, że są to azotki tytanu TiN (rys. 4a) oraz węgliki chromu  $Cr_{23}C_6$  (rysunek 4b).

### Badania odporności na korozję

Dla próbek 1 (linia przerywana) oraz 4 (linia ciągła) wykonano pomiar potencjału korozyjnego OCP (*Open Circuit Potential*). Jest to istotny parametr pozwalający na przewidywanie odporności korozyjnej badanego materiału metalicznego [7]. Badanie polegało na pomiarze potencjału bimetalu, w warunkach bezprądowych, względem elektrody odniesienia [8]. Na rysunku 5 przedstawiono zbiorczy wykres parametru OCP dla badanych materiałów. Próbki po przesycaaniu (4) mają wyższy potencjał, świadczący o ich odporności korozyjnej.



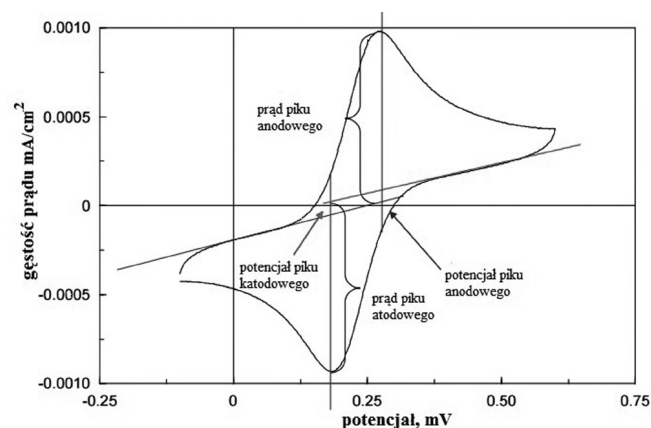
Rys. 5. Zbiorczy wykres parametru OCP  
Fig. 5. Cumulative parameter graph of OCP



Rys. 4. Analiza mikrostruktury: a) wydzielenie azotku TiN w próbce po wyżarzaniu 550 °C/5h, b) wydzielenie węglika  $Cr_{23}C_6$  w próbce po wyżarzaniu 550 °C/5h

Fig. 4. Analysis of the microstructure: a) eduction the nitride TiN in the sample after annealing 550 °C/5h, b) eduction carbide  $Cr_{23}C_6$  in the sample after annealing 550 °C/5h

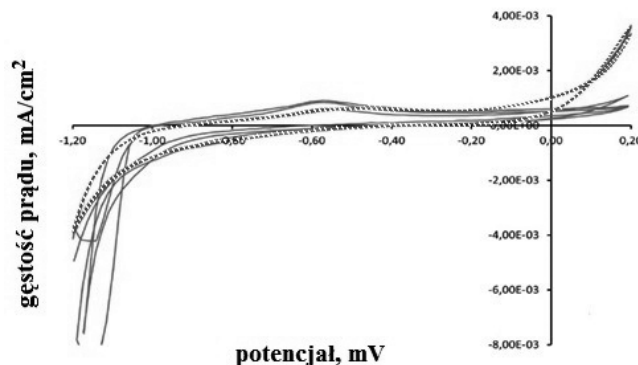
Aby ocenić zachowanie korozyjne badanego bimetalu, przeprowadzono pomiary liniowej woltamperometrii LSV (*Linear Sweep Voltammetry*). Schemat wyznaczania parametrów krzywej otrzymanej w wyniku pomiarów woltamperometrycznych został przedstawiony na rysunku 6. Pomiar polegał na rejestrowaniu odpowiedzi prądowej w zależności od liniowo rosnącego potencjału, który zadany był na badanej próbce. Dzięki temu otrzymano krzywe polaryzacyjne.



Rys. 6. Schemat wyznaczania parametrów LSV [7,8]  
Fig. 6. Determining scheme parameters LSV [7,8]

Badania polaryzacyjne dla próbek przeprowadzono w 0,1M roztworze chlorku sodu, szybkość skanowania potencjału przeprowadzono dla pięciu wariantów: 16,6 mV/s, 50 mV/s, 83,3 mV/s, 166 mV/s, 332 mV/s. Na rysunku 7 przedstawiono otrzymane krzywe polaryzacji katodowej

i anodowej poprzez zastosowanie pomiaru potencjału bimetalu względem półogniwa kalomelowego w funkcji czasu przy stałej gęstości prądu. W celu otrzymania dokładnych wyników dla każdego pomiaru wykonano po trzy cykle. Odnosząc się do schematu zamieszczonego na rysunku 5 zauważono, że w materiale nie występuje korozja wżerowa. Największe potencjały wystąpiły dla pików wyznaczonych dla wariantu 16,6 mV/s. Ilość pików świadczy o ilości zachodzących reakcji. Dla każdej z badanych próbek występuje jeden pik prądu anodowego związany z reakcją utleniania.



Rys. 7. Krzywe polaryzacji katodowej i anodowej dla potencjału 16,6 mV  
Fig. 7. Polarization curves for the anodic and cathodic potential of 16,6 mV

Na powierzchnię stali austenitycznej jest nałożony nikiel, w związku z tym, reakcja jaka zachodzi, to utlenianie niklu zgodne z reakcją:  $Ni^0 - 2e \rightarrow Ni^{2+}$ . Ze wzrostem potencjału wzrasta wysokość pików, świadcząca o tym, że zachodząca reakcja jest szybka, potencjodynamiczna [8].

## Podsumowanie

Plater, wykonany technologią zgrzewania wybuchowego poddano analizie wpływu obróbki cieplnej na jego mikrostrukturę i odporność korozyjną. Podczas przeprowadzonych badań zauważono, że wielkość ziaren stali austenitycznej różniła się kilkakrotnie od wielkości ziarna niklu, w linii złącza widoczne były obszary przetopione o drobnoziarnistej mikrostrukturze. Zarówno w mikrostrukturze stali austenitycznej, jak i niklu zaobserwowano bliźniaki wyżarzania. Na obrazach pochodzących z mikroskopu skaningowego zaobserwowano liczne wydzielienia takie jak: TiN,  $Cr_{23}C_6$  oraz fazy międzymetaliczne molibdenu. Na podstawie obserwacji mikrostruktury wykonanej przy pomocy mikroskopu skaningowego i analizy termodynamicznej węglikoazotków stwierdzono, że tytan i niob, które powinny stabilizować austenit, nie spełniły swojej roli w badanym materiale. Zatem węgiel może w badanej stali wchodzić w relację z Cr, co w środowisku korozyjnym może powodować korozję międzykrystaliczną. Jednak jego mała zawartość (0,01%) nie powinna znacznie obniżyć odporność stali na korozję. W dalszej części wykonano badanie odporności na korozję, a analiza parametru OCP wykazała, że próbki przesycone w temperaturze 1050 °C posiadają mniejszą tendencję do korozji w porównaniu z materiałem surowym. Otrzymane wyniki świadczą o tym, że pojawiająca się korozja ma charakter potencjodynamiczny i nie powinna wpływać znacząco na własności mechaniczne wykonanego plateru.

## Literatura

- [1] Najwer M., Niesłony P.: Ocena mikrotwardości oraz własności wytrzymałościowych trimetalu AA2519-AA1050-Ti6Al4V po różnych obróbkach cieplnych, *Przegląd Spawalnictwa*, nr 4, s. 16-18, 2016
- [2] Kurek A.: Trwałość zmęczeniowa elementów maszyn wykonanych z bimetalu stal – tytan zgrzewanego wybuchowo, Politechnika Opolska, Opole, 2011
- [3] Prażmowski M., Rozumek D., Paul H.: Trwałość zmęczeniowa bimetalu cyrkon-stal w aspekcie charakterystyki złącza, *Przegląd Spawalnictwa*, nr 4, s. 12-15, 2016
- [4] Pocica A., Najwer M.: Obróbka cieplna zgrzewanych wybuchowo bimetalu ze stali austenitycznych, *Przegląd Spawalnictwa*, nr 5, s. 54-58, 2014
- [5] Schweitzer P.A.: *Fundamentals of Corrosion – Mechanism, Causes and Preventative Methods*, CRC Press, 2009
- [6] Kozłowski J., Kozłowski J.: Spawanie to nie wszystko Zabezpieczenie antykorozyjne spawanych konstrukcji stalowych – kontrola i badania, *Przegląd Spawalnictwa*, nr 5, 10-15, 2016
- [7] Adamiec J., Januszkiewicz M.: Ocena odporności na korozję wysokotemperaturową złączy spawanych laserowo rur ożebrowanych wykonanych ze stopów niklu, *Przegląd Spawalnictwa*, nr 10, 88-91, 2015
- [8] Bard A.J., Inzelt G., Scholz F.: *Electrochemical Dictionary* Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.