

# Mikrostruktura i właściwości warstw nadtapianych wiązką elektronową

## Microstructure and properties of electron beam melted layers

### Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę mikrostruktury i mikrotwardości przetopień wykonanych na próbkach ze stali austenitycznych. W pierwszej fazie badań skąd określono przewidywane struktury oraz morfologii przetopień. Następnie przystąpiono do badań metalograficznych makro- i mikroskopowych. Ujawnione struktury zostały szczegółowo opisane i przedstawione na mikrofotografiach. Wyniki pomiaru mikrotwardości (HV1) przedstawiono na wykresach. We wnioskach zawarto porównanie przewidywanych i uzyskanych struktur oraz składu przetopień. Dokonano również zestawienia i analizy statystycznej wyników pomiarów mikrotwardości.

### Abstract

The article presents analyze the microstructure and microhardness of the fusions performed on samples made of austenitic steel. In the first phase of the studies there was determined the expected structure and morphology of the fusions. Next the metallographic examinations of macro- and microscopic were proceeded. The obtained structures were described in detail and presented to photomicrographs. The results received in microhardness tests (HV1) were presented in the microhardness decomposition graphs. The conclusions comparison of the predicted and the obtained structures and morphology of the fusions. There was also made a combination and statistical analysis of microhardness test results.

### Wstęp

Spawanie wiązką elektronów znajduje zastosowanie w łączeniu elementów z metali różnorodnych i elementów o skomplikowanych kształtach, gdzie wytworzenie połączenia klasycznymi metodami spawania byłoby niemożliwe. Skoncentrowana wiązka elektronów wykorzystywana jest nie tylko do spawania metali, ale także do obróbki cieplnej, rafinacji metali oraz modyfikacji powierzchni.

Spawarka elektronowa składa się z pięciu podstawowych zespołów funkcjonalnych (rys. 1) [1, 3]:

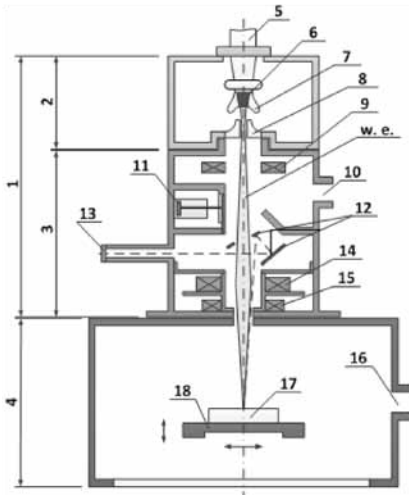
- zespołu wyrzutni elektronowej (1) składającej się z komory (2) i kolumny przelotowej (3);
- zespołu komory roboczej (4) (komory spawania);

- zespołu układów próżniowych ( $10^{-2}$ ÷ $10^{-5}$  mbar);
- systemu sterowania;
- systemu obserwacji (optycznej i/lub monitorowej).

Stosowane obecnie spawarki różnią się budową, ciśnieniem w komorze roboczej i napięciem przyspieszającym oraz systemem działania komór próżniowych (rys. 2, 3). Zastosowanie odpowiedniego systemu działania komory zależy od rodzaju, wielkości oraz liczby elementów łączonych [3].

Klasycznym, a zarazem najbardziej uniwersalnym rozwiązaniem jest zastosowanie jednej komory roboczej, wyposażonej w stół manipulacyjny o trzech stopniach swobody (rys. 3a). Wadą tego rozwiązania jest długi czas cyklu spawania, na który składa się prawidłowe zamocowanie elementu na stole manipulacyjnym, wytworzenie odpowiedniej próżni, spawanie, zapowietrzenie oraz wyjęcie gotowego elementu. W celu skrócenia czasu tego cyklu spawania opracowano spawarki jednokomorowe wyposażone w stół obrotowy (rys. 3b i 3d) oraz wielokomorowe (rys. 3c i 3e). W zależności od wymaganej próżni stosuje się różne modyfikacje tych rozwiązań.

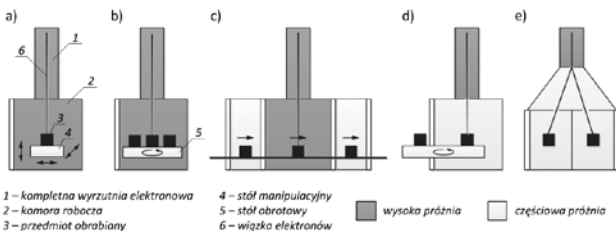
**Prof. dr hab. inż. Jerzy Nowacki, mgr inż. Krzysztof Pietrzak** – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.



**Rys. 1.** Schemat spawarki elektronowej. Opracowanie własne na podstawie [1]; 1 – zespół wyrzutni elektronowej, 2 – komora wyrzutni, 3 – kolumna przelotowa, 4 – zespół komory roboczej, 5 – kabel wysokiego napięcia, 6 – termokatoda, 7 – elektroda sterująca, 8 – anoda, 9 – cewki korekcyjne, 10 – połączenie z układem próżniowym, 11 – zawór odcinający, 12 – lustra systemu optycznego, 13 – wziernik systemu optycznego, 14 – cewka ogniskująca, 15 – cewki odchylające, 16 – połączenie z układem próżniowym, 17 – przedmiot obrabiany, 18 – stolik manipulacyjny, w.e. – wiązka elektronów [1]  
**Fig. 1.** Schematic electron beam welder. Own study based on [1]; 1 – complete assembly of the electron gun, 2 – electron gun chamber, 3 – cruising column, 4 – working chamber, 5 – high voltage cable, 6 – thermo cathode, 7 – control electrode, 8 – anode, 9 – correction coil, 10 – connection to a vacuum system, 11 – valve, 12 – optical system mirrors, 13 – sight glass optical system, 14 – focusing coil, 15 – deflection coil, 16 – connection to a vacuum system, 17 – treated item, 18 – positioning mechanism, w.e. – electron beam [1]



**Rys. 2.** Podział spawarek elektronowych. Opracowanie własne na podstawie [2]  
**Fig. 2.** Electron beam welder classification. Own study based on [2]



**Rys. 3.** Rozwiązania konstrukcyjne spawarek elektronowych. Opracowanie własne na podstawie [2, 3]. Spawarka elektronowa: a) jednokomorowa ze stołem manipulacyjnym (WP), b) jednokomorowa ze stołem obrotowym (WP), c) wielokomorowa – taśmowa (WP), d) jednokomorowa ze stołem obrotowym (CP), e) wielokomorowa wykorzystująca quasi-wielokrotną wiązkę elektronów (CP); proces spawania: WP – w wysokiej próżni, CP – w częściowej próżni [2, 3]  
**Fig. 3.** Electron beam welding solutions. Own study based on [2, 3]. Electron beam welder: a) single chamber with a table manipulative (WP), b) single chamber with rotary table (WP), c) multi-chamber – band (WP), d) single chamber with rotary table (CP), e) multi-chamber using a quasi-multiple electron beam (CP), the welding process in: WP – high vacuum, CP – partial vacuum [2, 3]

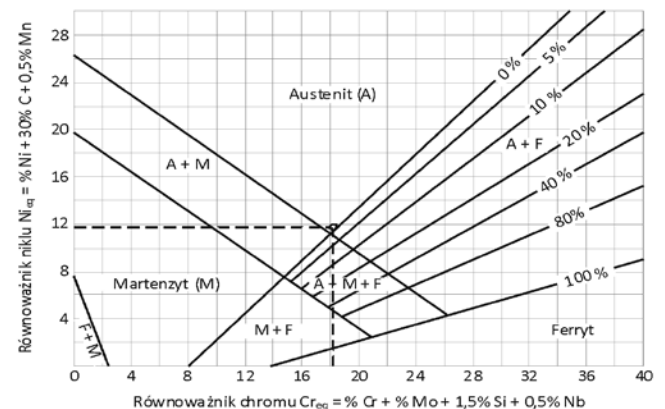
## Badania warstw przetapianych wiązką elektronową

Badaniom poddano próbki austenitycznych stali nierdzewnych X9CrNi18-9 i X10CrNi18-8 przetapianych wiązką elektronową za pomocą uniwersalnej spawarki elektronowej o mocy do 6 kW i napięciu przyspieszającym 30 kV. Na podstawie wyników spektrometrycznych badań składu chemicznego stali określono zawartość i rozkład ferrytu w przetopionych obszarach (tabl. I). W tym celu posłużono się wykresem Schaefflera oraz schematem pseudopodwójnego układu Fe-Cr-Ni (rys. 4+6). Wytrawione odczynnikiem Mi19Fe

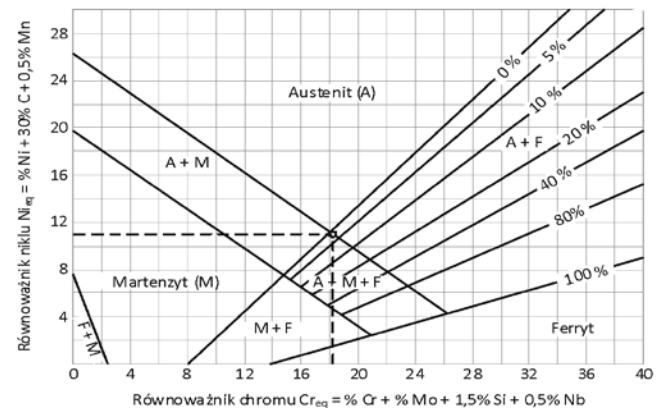
**Tablica I.** Porównanie składu chemicznego próbek X9CrNi18-9 i X10CrNi18-8 [%]

**Table I.** Chemical composition of X9CrNi18-9 and X10CrNi18-8 comparison [%]

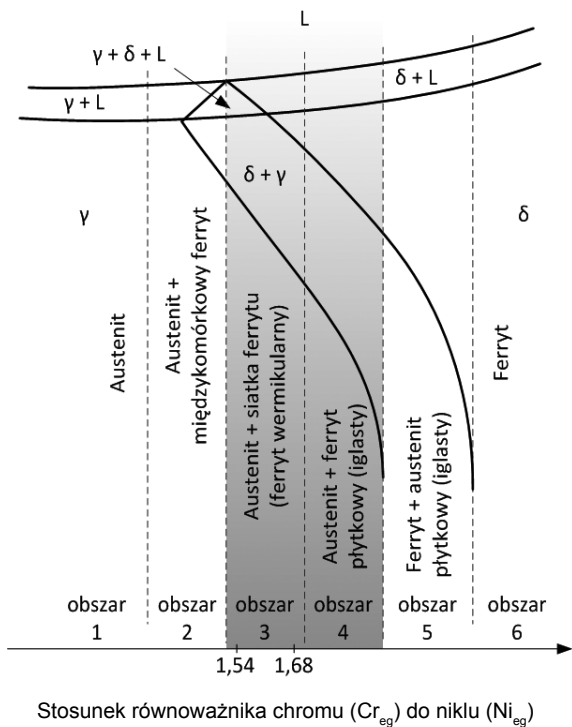
Próbka	C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	Nb
X9CrNi18-9	0,055	17,6	9,82	0,302	0,685	0,149	0,038
X10CrNi18-8	0,04	17,2	8,72	0,45	1,84	0,284	0,031



**Rys. 4.** Wykres Scheafflera dla próbki X9CrNi18-9,  $Cr_{eq} = 18,221$ ,  $Ni_{eq} = 11,8125$   
**Fig. 4.** Scheaffler graph for X9CrNi18-9 sample,  $Cr_{eq} = 18,221$ ,  $Ni_{eq} = 11,8125$



**Rys. 5.** Wykres Scheafflera dla próbki X10CrNi18-8,  $Cr_{eq} = 18,1745$ ,  $Ni_{eq} = 10,84$   
**Fig. 5.** Scheaffler graph for X10CrNi18-8 sample,  $Cr_{eq} = 18,1745$ ,  $Ni_{eq} = 10,84$



**Rys. 6.** Schemat pseudopodwójnego układu Fe-Cr-Ni przedstawiający zakresy składów i otrzymane podczas krzepnięcia struktury spoin: obszar 1 – austeniczny; obszary 2, 3, 4 – austenityczno-ferrytyczne; obszar 5 – ferrytyczno-austenityczny; obszar 6 – ferrytyczny. Opracowanie na podstawie [5]

**Fig. 6.** Scheme of quasi-double Fe-Cr-Ni for the range of chemical composition and structures in solidification process of welds: zone 1 – austenitic, zone 2, 3, 4 – austenitic-ferritic, zone 5 – ferritic-austenitic, zone 6 – ferritic. Based on [5]

(3 g FeCl<sub>3</sub>, 10 ml HCl, 90 ml C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) zgłady metalograficzne poddano badaniom makro- i mikroskopowym oraz wykonano pomiary mikrotwardości (HV 1).

Dla próbek wykonanych z dwóch gatunków stali austenitycznych (X9CrNi18-9, X10CrNi18-8) obliczono równoważnik chromu (Cr<sub>eq</sub>) i równoważnik niklu (Ni<sub>eq</sub>) oraz określono z wykresu Scheafflera strukturę i ilość ferrytu zawartego w obszarze przetapianym.

## Teoretyczna analiza struktury przetopień

W celu określenia wpływu pierwiastków stopowych na rodzaj struktury występującej w nadtopieniu obliczono równoważnik chromu (Cr<sub>eq</sub>) i równoważnik niklu (Ni<sub>eq</sub>). Znając ich wartości, z wykresu Scheafflera odczytano przewidywaną strukturę i zawartość ferrytu w nadtopieniu.

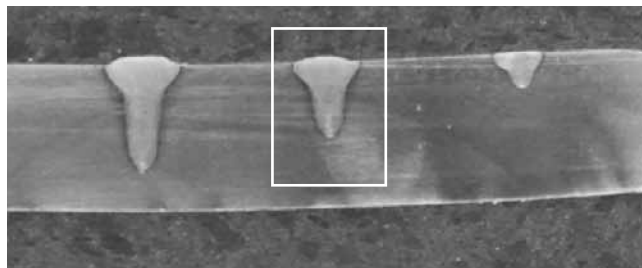
- dla próbki X9CrNi18-9 – Cr<sub>eq</sub>/Ni<sub>eq</sub> = 1,54252%
- dla próbki X10CrNi18-8 – Cr<sub>eq</sub>/Ni<sub>eq</sub> = 1,6766%

Znając tę wartość, strukturę obszarów przetapianych określono na podstawie pseudopodwójnego układu Fe-Cr-Ni.

Z rozważań wynika, że przewidywana struktura odczytana z wykresu Scheafflera dla nadtopień stali X9CrNi18-9 powinna być wyłącznie austenityczna, a w strukturze nadtopień stali X10CrNi18-8 można spodziewać się austenitu, martenzytu i 2-3 % ferrytu. Natomiast wg pseudopodwójnego układu Fe-Cr-Ni nadtopienia te powinny uzyskać strukturę austenityczną z ferrytem o budowie wermikularnej (siatkowej, szkieletowej).

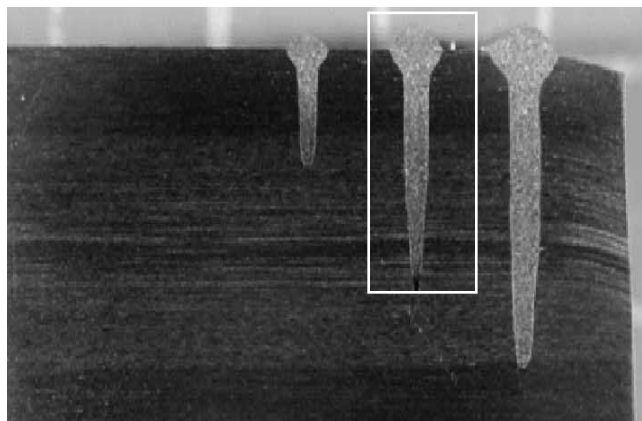
## Makro- i mikrostruktura warstw przetopień wiązką elektronową

Przykłady wyników badań metalograficznych nadtopień wykonanych na stalach X9CrNi18-9 i X10CrNi18-8 w warunkach dobranych na podstawie badań wstępnych wraz z analizą geometrii z zaznaczonymi obszarami badań metalograficznych przedstawiono na rysunkach 7-36.



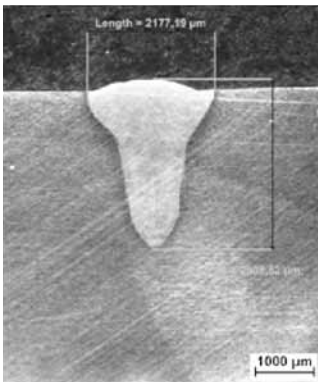
**Rys. 7.** Zgląd makroskopowy próbki X9CrNi18-9. Parametry nadtopiania: napięcie przyspieszające – 30 kV, prąd wiązki 100 mA, prędkość nadtopiania: (od lewej) 70, 110, 150 mm/s

**Fig. 7.** Macrostructure of X9CrNi18-9; accelerating energy – 30 kV, current – 100 mA, melting velocity (from left) – 70, 110, 150 mm/s

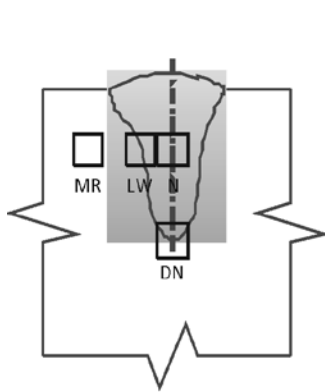


**Rys. 8.** Zgląd makroskopowy próbki X10CrNi18-8. Parametry nadtopiania: napięcie przyspieszające – 30 kV, prąd wiązki 200 mA, prędkość nadtopiania: (od lewej) 100, 50, 35 mm/s

**Fig. 8.** Macrostructure of X10CrNi18-8; accelerating energy – 30 kV, current – 100 mA, melting velocity (from left) – 100, 50, 35 mm/s

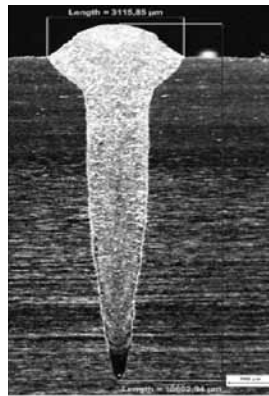


**Rys. 9.** Zgląd makroskopowy nadtopienia stali X9CrNi18-9. Głębokość wtopienia – 2,1 mm, szerokość nadtopienia – 2,2 mm  
**Fig. 9.** Macrostructure of melted X9CrNi18-9. Fusion depth – 2.1 mm, fusion length – 2.2 mm

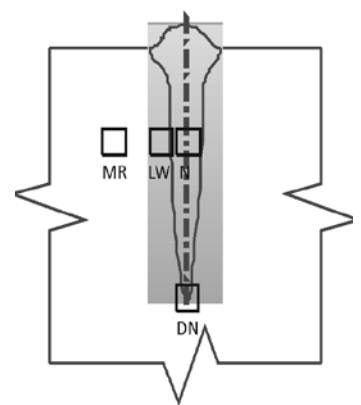


**Rys. 10.** Rozmieszczenie obszarów poddanych badaniom metalograficznym mikroskopowym nadtopienia stali X9CrNi18-9; MR – materiał rodzimy, LW – linia nadtopienia, N – nadtopienie, DN – dno nadtopienia

**Fig. 10.** Placement of zones in melted X9CrNi18-9 steel for microscopic tests of; MR – base metal, – fusion line, N – melted zone; DN – melted zone bottom



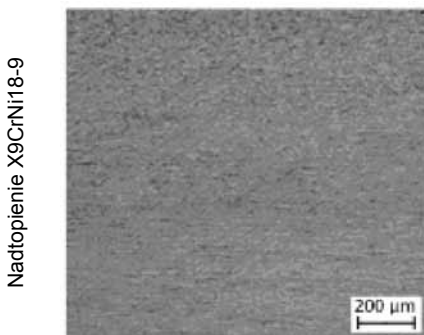
**Rys. 11.** Zgląd makroskopowy przetopienia X10CrNi18-8. Głębokość wtopienia – 10,1 mm, szerokość nadtopienia – 3,1 mm  
**Fig. 11.** Macrostructure of melted X10CrNi18-8. Fusion depth – 10.1 mm, Fusion length – 3.1 mm



**Rys. 12.** Rozmieszczenie obszarów poddanych badaniom metalograficznym mikroskopowym nadtopienia stali X10CrNi18-8; MR – materiał rodzimy, LW – linia nadtopienia, N – nadtopienie, DN – dno nadtopienia

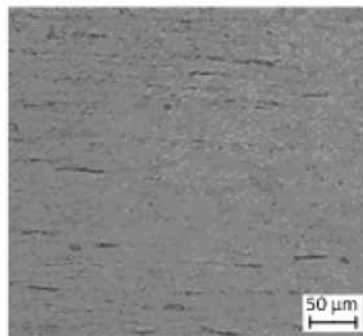
**Fig. 12.** Placement of zones in melted X10CrNi18-8 for microscopic tests; MR – base metal, – fusion line, N – melted zone, DN – melted zone bottom

## Materiał rodzimy (MR)



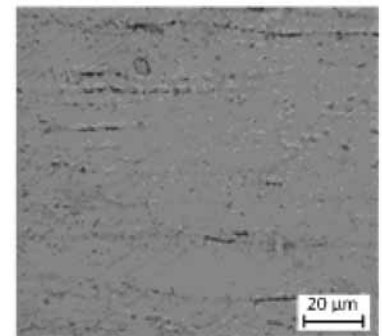
**Rys. 13.** Struktura stali austenicznej chromowo-niklowej

**Fig. 13.** The structure of austenitic chromium-nickel steel



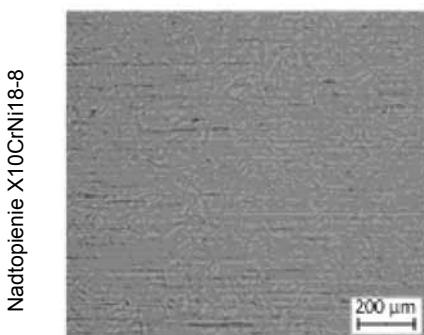
**Rys. 14.** Struktura stali austenicznej z ferrytem o budowie pasmowej

**Fig. 14.** The structure of austenitic with banded-ferrite



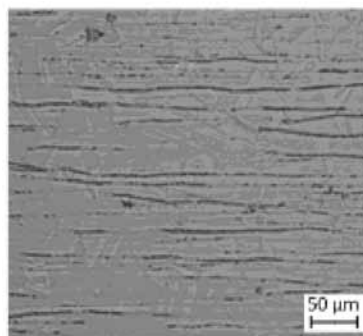
**Rys. 15.** Struktura stali austenicznej z ferrytem o budowie pasmowej

**Fig. 15.** The structure of austenitic with banded-ferrite



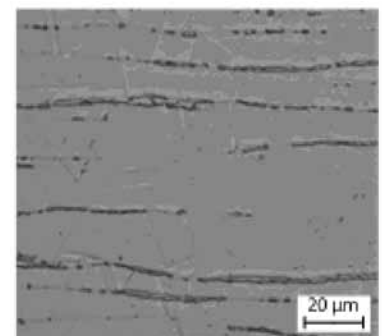
**Rys. 16.** Austenit z widocznymi bliźniakami rekrytalizacji

**Fig. 16.** Austenite with recrystallization twins



**Rys. 17.** Austenit z bliźniakami rekrytalizacji oraz ferrytem o budowie pasmowej

**Fig. 17.** Austenite with recrystallization twins and banded-ferrite

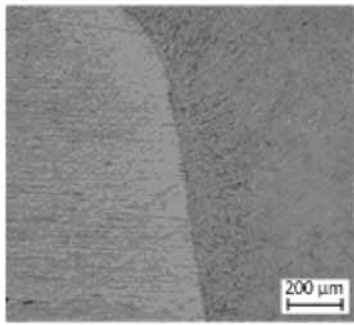


**Rys. 18.** Austenit z bliźniakami rekrytalizacji oraz ferrytem o budowie pasmowej

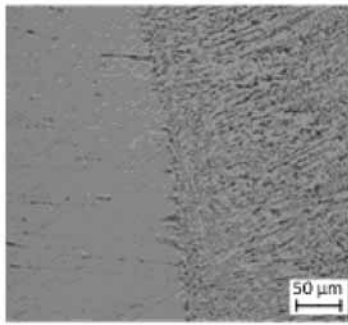
**Fig. 18.** Austenite with recrystallization twins and banded-ferrite

## Linia wtopienia (LW)

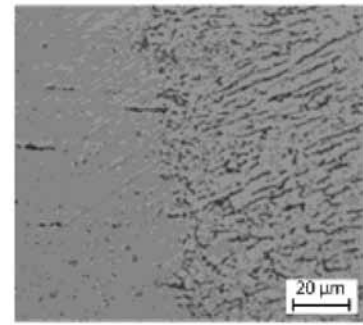
Nadtopienie X9CrNi18-9



**Rys. 19.** Struktura obszaru linii wtopienia  
**Fig. 19.** Fusion line structure

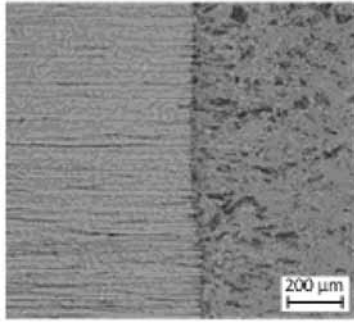


**Rys. 20.** Struktura obszaru linii wtopienia  
**Fig. 20.** Fusion line structure

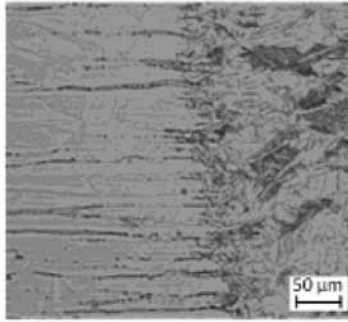


**Rys. 21.** Struktura obszaru linii wtopienia  
**Fig. 21.** Fusion line structure

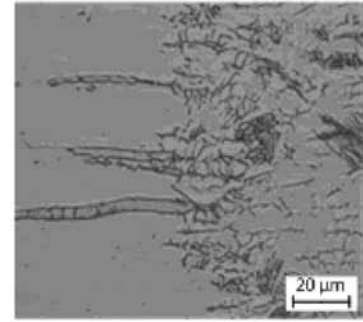
Nadtopienie X10CrNi18-8



**Rys. 22.** Struktura obszaru linii wtopienia – wąska strefa wpływu ciepła o podwyższonej zawartości ferrytu  $\delta$   
**Fig. 22.** Fusion line structure – narrow heat affected zone with increased contents of ferrite  $\delta$



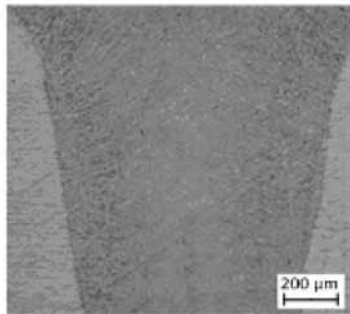
**Rys. 23.** Struktura obszaru linii wtopienia – wąska strefa wpływu ciepła o zwiększonej zawartości ferrytu  $\delta$   
**Fig. 23.** Fusion line structure – narrow heat affected zone with increased contents of ferrite  $\delta$



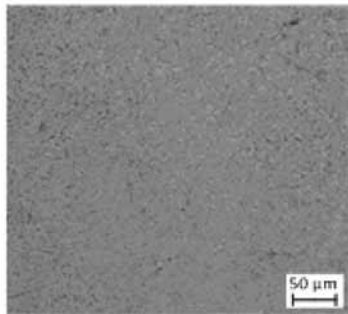
**Rys. 24.** Struktura obszaru linii wtopienia – wąska strefa wpływu ciepła o zwiększonej zawartości ferrytu  $\delta$   
**Fig. 24.** Fusion line structure – narrow heat affected zone with increased contents of ferrite  $\delta$

## Przetopienie (N)

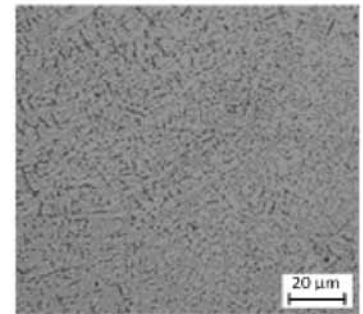
Nadtopienie X9CrNi18-9



**Rys. 25.** Struktura dendrytyczna  
**Fig. 25.** Dendritic structure

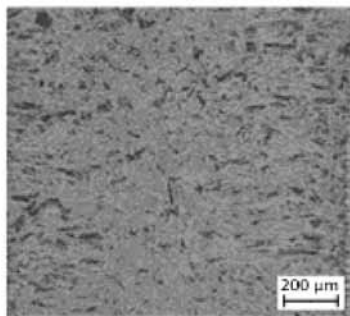


**Rys. 26.** Struktura przetopienia stali austenitycznej – ferryt międzidendrytyczny  
**Fig. 26.** Austenitic steel structure of melted zone – ferrite of interdendritic structure

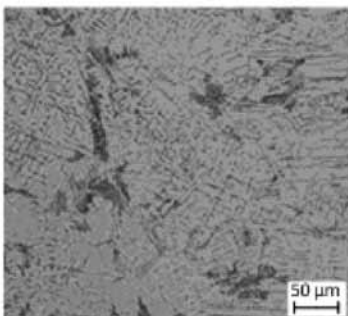


**Rys. 27.** Struktura przetopienia stali austenitycznej – ferryt międzidendrytyczny  
**Fig. 27.** Austenitic steel structure of melted zone – ferrite of interdendritic structure

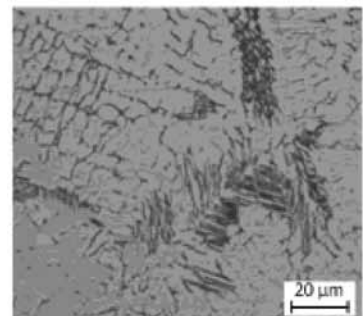
Nadtopienie X10CrNi18-8



**Rys. 28.** Struktura dendrytyczna  
**Fig. 28.** Dendritic structure



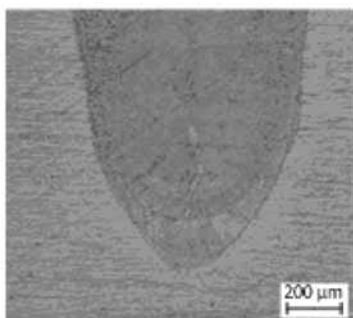
**Rys. 29.** Struktura przetopienia stali austenitycznej – ferryt w postaci siatkowej  
**Fig. 29.** Austenitic steel structure of melted zone – reticular ferrite



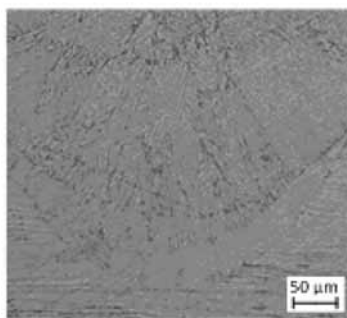
**Rys. 30.** Struktura nadtopienia stali austenitycznej z ferrytem w postaci siatkowej  
**Fig. 30.** Austenitic steel structure of melted zone – reticular ferrite

## Dno przetopienia (DN)

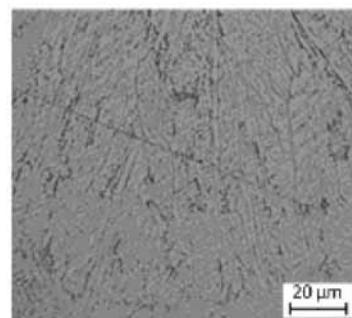
Nadtopenie X9CrNi18-9



**Rys. 31.** Obszar dna przetopienia z widocznymi frontami krystalizacji  
**Fig. 31.** Bottom of melted zone with solidification front

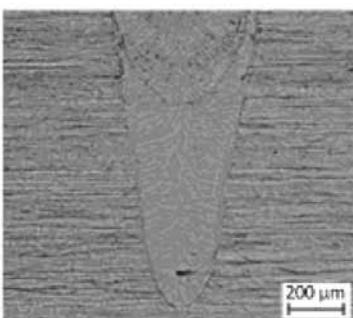


**Rys. 32.** Obszar dna przetopienia z widocznymi frontami krystalizacji  
**Fig. 32.** Bottom of melted zone with solidification front

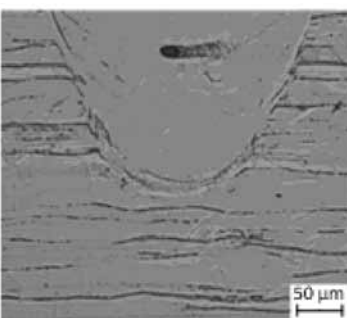


**Rys. 33.** Obszar dna przetopienia  
**Fig. 33.** Bottom of melted zone

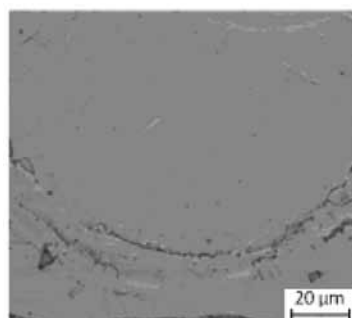
Nadtopenie X10CrNi18-8



**Rys. 34.** Obszar dna nadtopienia z widocznymi frontami krystalizacji  
**Fig. 34.** Bottom of melted zone with solidification front



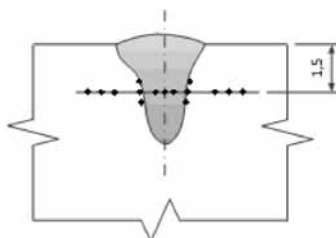
**Rys. 35.** Obszar dna nadtopienia o strukturze czysto austenitycznej z bliźniakami rekrytalizacji  
**Fig. 35.** Bottom of melted zone with austenitic structure with recrystallization twins



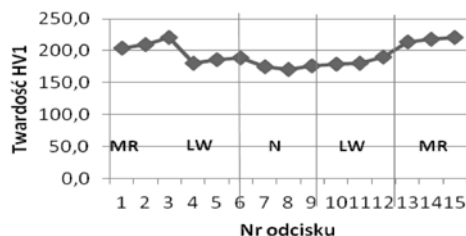
**Rys. 36.** Obszar dna nadtopienia o strukturze czysto austenitycznej z bliźniakami rekrytalizacji  
**Fig. 36.** Bottom of melted zone with austenitic structure with recrystallization twins

## Mikrotwardość przetopień wiązką elektronową

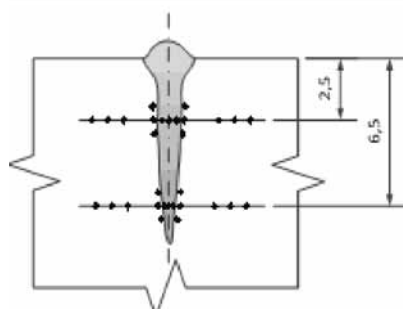
Badanie mikrotwardości (HV1) wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 9015-2:2011 za pomocą mikrotwardościomierza FM-700 Futuretech. Rozmieszczenie punktów pomiarowych i rozkłady HV 1 przedstawiono na rysunkach 37 i 38. Różnice rozkładu mikrotwardości w analizowanych obszarach wynikają prawdopodobnie z różnej ilości ciepła wprowadzonego do tych obszarów i będą przedmiotem dalszych badań.



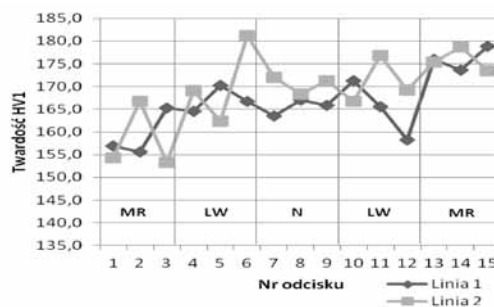
**Rys. 37.** Rozmieszczenie punktów pomiarowych (a) i rozkład HV 1 (b) próbki X9CrNi18-9 – pomiar twardości; MR – materiał rodzimy, LW – linia nadtopienia, N – nadtopienie



**Fig. 37.** X9CrNi18-9 sample hardness test results: a) measurement points placement, b) HV1 hardness decomposition; MR – base metal, LW – fusion line, N – melted zone



**Rys. 38.** Rozmieszczenie punktów pomiarowych (a) i rozkład HV1 (b) HV1 próbki X10CrNi18-8 – pomiar twardości. Linia 1 (2,5 mm), Linia 2 (6,5 mm); MR – materiał rodzimy, LW – linia nadtopienia, N – nadtopienie



**Fig. 38.** X10CrNi18-8 sample hardness test results: a) measurement points placement: line 1 (2.5 mm), line 2 (6.5 mm); b) HV1 hardness decomposition; MR – base metal, LW – fusion line, N – melted zone

## Wnioski

Porównanie przewidywanych (odczytanych z wykresu Scheafflera i pseudopodwójnego układu Fe-Cr-Ni) i rzeczywistych (uwidocznionych w badaniach mikroskopowych) struktur i morfologii przetopień przedstawiono w tablicy II.

Rozbieżności pomiędzy przewidywaną, określoną za pomocą wykresu Scheafflera oraz pseudopodwójnego układu Fe-Cr-Ni, a rzeczywistą, uwidoczną w badaniach metalograficznych mikroskopowych strukturą i morfologią (budową ferrytu  $\delta$ ) nadtopień mogą wynikać z tego, iż te wykresy sporządzone były dla klasycznych metod spawania. Uzyskane w badaniach mikrotwardości (HV 1) wyniki poddano prostej analizie statystycznej w celu określenia średniej mikrotwardości, wielkości rozstępu oraz wariancji i odchylenia standardowego (miary zmienności). W tablicy III przedstawiono wyniki przeprowadzonej analizy statystycznej.

**Tablica II.** Porównanie przewidywanych i rzeczywistych struktur i morfologii przetopień

**Table II.** Comparison of suspected and real structure and morphology of melted zones

Próbka	Przewidywana struktura		Uzyskana struktura
	wg wykresu Scheafflera	wg pseudopodwójnego układu Fe-Cr-Ni	
X9CrNi18-9	struktura czysto austenityczna	struktura austenityczna z ferrytem o budowie wermikularnej lub płytkowej	struktura austenityczna z ferrytem o budowie międzydendrytycznej
X10CrNi18-8	struktura trójfazowa: austenit (A), martenzyt (M), ferryt (F) w ilości ok. 7%	struktura austenityczna zawierająca ferryt wermikularny lub płytkowy	struktura austenityczna zawierająca ferryt wermikularny (siatkowy, szkieletowy)

Norma PN-EN 10088 nie podaje, jakie powinny być maksymalne twardości HV stali austenitycznych X10CrNi18-8 oraz X9CrNi18-9. Jednakże według jednego z wiodących producentów stali nierdzewnych, firmy Thyssen Krupp, stale austenityczne tych gatunków powinny charakteryzować się maksymalną twardością w granicach 225÷240 HV. Najwyższe uzyskane w badaniach wartości mieszczą się w dopuszczalnych granicach. Najmniejsze wartości najczęściej występowały w obszarach nadtopienia oraz linii wtopienia. Spowodowane jest to zwiększoną w tych obszarach zawartością ferrytu  $\delta$ , który charakteryzuje się mniejszą twardością niż austenit. Wyniki analizy statystycznej świadczą o małym rozproszeniu wyników pomiarów mikrotwardości.

Przemiany struktury i twardości stali nierdzewnych austenitycznych w wyniku nadtopienia elektronowego są bardzo ograniczone w porównaniu z innymi metodami nadtopienia. Strefa wpływu ciepła jest pomijalnie mała, a nadtopienie wykazuje wysoką jednorodność mikrostruktury i rozkładu mikrotwardości.

**Tabela III.** Zestawienie wyników analizy statystycznej mikrotwardości przetopień

**Table III.** Results of statistic analysis of melted zone microhardness

Przetopienie stali		Mikrotwardość (HV 1)					
		Max ( $x_{max}$ )	Min ( $x_{min}$ )	Średnia ( $\bar{x}$ )	Rozstęp (R)	Wariancja ( $s^2$ )	Odchylenie standardowe (s)
X9CrNi18-9	Linia 1 (1,5 mm)	221,3	171,1	194,6	50,2	331,80	18,22
X10CrNi18-8	Linia 1 (2,5 mm)	178,9	155,6	166,6	23,3	44,64	6,68
	Linia 2 (6,5 mm)	181,2	153,2	169,3	28,0	64,17	8,01

## Literatura

- [1] [www.isf.RWTH-Aachen.de/index.php?id=18](http://www.isf.RWTH-Aachen.de/index.php?id=18) (stan na dzień 10.09.2011).
- [2] Barwicz W.: Wiązka elektronowa w przemyśle, WNT, Warszawa, 1989.
- [3] Diltthey U.: Postęp w technologii spawania elektronowego i spawania laserowego, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 05/2005.
- [4] Philips A., Nowak M., Nowak M.: Spawanie elektronowe w ciśnieniu zredukowanym – innowacyjna metoda spawania słupów elektrowni wiatrowych, Przegląd Spawalnictwa 12/2009.
- [5] Tasak E.: Metalurgia spawania, Wydawnictwo JAK, Andrzej Choczewski, Kraków, 2008.