

# MIKROSTRUKTURA I WŁASNOŚCI MECHANICZNE ZŁĄCZA SPAWANEGO WIĄZKĄ ELEKTRONÓW ZE STALI 316Ti

Marek Stanisław Węglowski<sup>1</sup>, Piotr Noga<sup>2</sup>, Maria Richert<sup>3</sup>, Krzysztof Kwieciński<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> Łukasiewicz – Instytut Spawalnictwa, Gliwice  
<sup>2</sup> AGH, Wydział Metali Nieżelaznych, Kraków  
<sup>3</sup> AGH, Wydział Zarządzania, Kraków

## Wprowadzenie

Zwiększona odporność na korozję powoduje, że stale w gatunku 316Ti stosuje się w przemyśle chemicznym, energetyce jądrowej, technologii próżniowej, oprzyrządowaniu reaktorów, budowie okrętów podwodnych, budowie pieców, przemyśle winiarskim, tekstylnym, włókienniczym, fotograficznym, chemicznym i farmaceutycznym. Materiał ten jest coraz częściej wykorzystywany w układach wydechowych silników spalinowych. Zwiększona zawartość tytanu stabilizuje stężenie chromu podczas obróbki cieplnej oraz zapobiega korozji międzykrystalicznej. Stal tę można spawać zarówno przy wykorzystaniu metod łukowych jak i wiązki laserowej lub elektronów. Jednak od zastosowanych technologii i parametrów technologicznych spawania zależą mikrostruktura w złączy spawanym, w tym również wzajemny udział fazy austenicznej i ferrytycznej.

Równocześnie spawanie przy użyciu wiązki elektronów umożliwia uzyskanie wysokiej jakości złączy dla szerokiej gamy materiałów konstrukcyjnych, również złączy różnoimennych i grubości spawanych elementów od 0,01 mm do 250 mm w jednym przybliżeniu. Proces prowadzony jest w próżni, co zapewnia wysoką czystość metalurgiczną spoin oraz dodatkową rafinację ciekłego metalu w trakcie spawania. Ponadto spawanie wiązką elektronów zapewnia wysoką wydajność procesu i jego pełną powtarzalność.

## Metodyka badań

Do badań przygotowano płyty o wymiarach 150×300 mm ze stali odpornej na korozję w gatunku AISI 316Ti (1.571, X2CrNiMoTi17-12-2, wg PN-EN 10088-2) OUTOKUMPU o grubości 6 mm. Skład chemiczny przedstawiono w tabeli 1. Spawanie wiązką elektronów zostało przeprowadzone przy użyciu urządzenia XW150:30/756 (Cambridge Vacuum Engineering) – rys. 1. Proces spawania zrealizowano przy następujących parametrach spawania: natężenie prądu wiązki I=10 mA, napięcie przyspieszające U=120 kV, prędkość spawania v=500 mm/min, Focus=210 mm. Wykonano również spoinę wygładzającą: I=10,0 mA, U=120kV, v=500 mm/min. Próżnia wynosiła 5×10<sup>-5</sup> mbar. W celu oceny jakości złączy przeprowadzono badania nieniszczące VT, PT i RT.

Badania mikrostruktury złączy przeprowadzono na mikroskopie świetlnym Olympus GX51 oraz SEM HITACHI SU-70 z przystawką do mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego (EDS). Określano skład chemiczny w mikroobszarach lica spoiny, środka spoiny, grani spoiny, a także w strefie wpływu ciepła. Badania EBSD zostały przeprowadzone na skaningowym mikroskopie elektronowym Hitachi S3400N przy napięciu 20 kV wyposażonym w kamerę CCD (HKL Nordlys) sterowaną przez oprogramowanie HKLChannels. W celu ujawnienia mikrostruktury stali AISI 316Ti zgłady trawiono elektrolitycznie w 10% kwasie azotowym przy napięciu 1,5V, w czasie 20 sekund, w temperaturze pokojowej. Badania pomiaru zawartości ferrytu w materiale rodzimym oraz w spoinie wykonano metodą metalografii ilościowej. Statyczne próby rozciągania zostały przeprowadzone na trzech pobranych próbkach, przy użyciu maszyny wytrzymałościowej MTS Criterion C45. Pomiar twardości wykonano przy obciążeniu wgłębnika siłą 19,61 N (HV 2). Do badań użyto twardościomierza Shimadzu HMV-G.



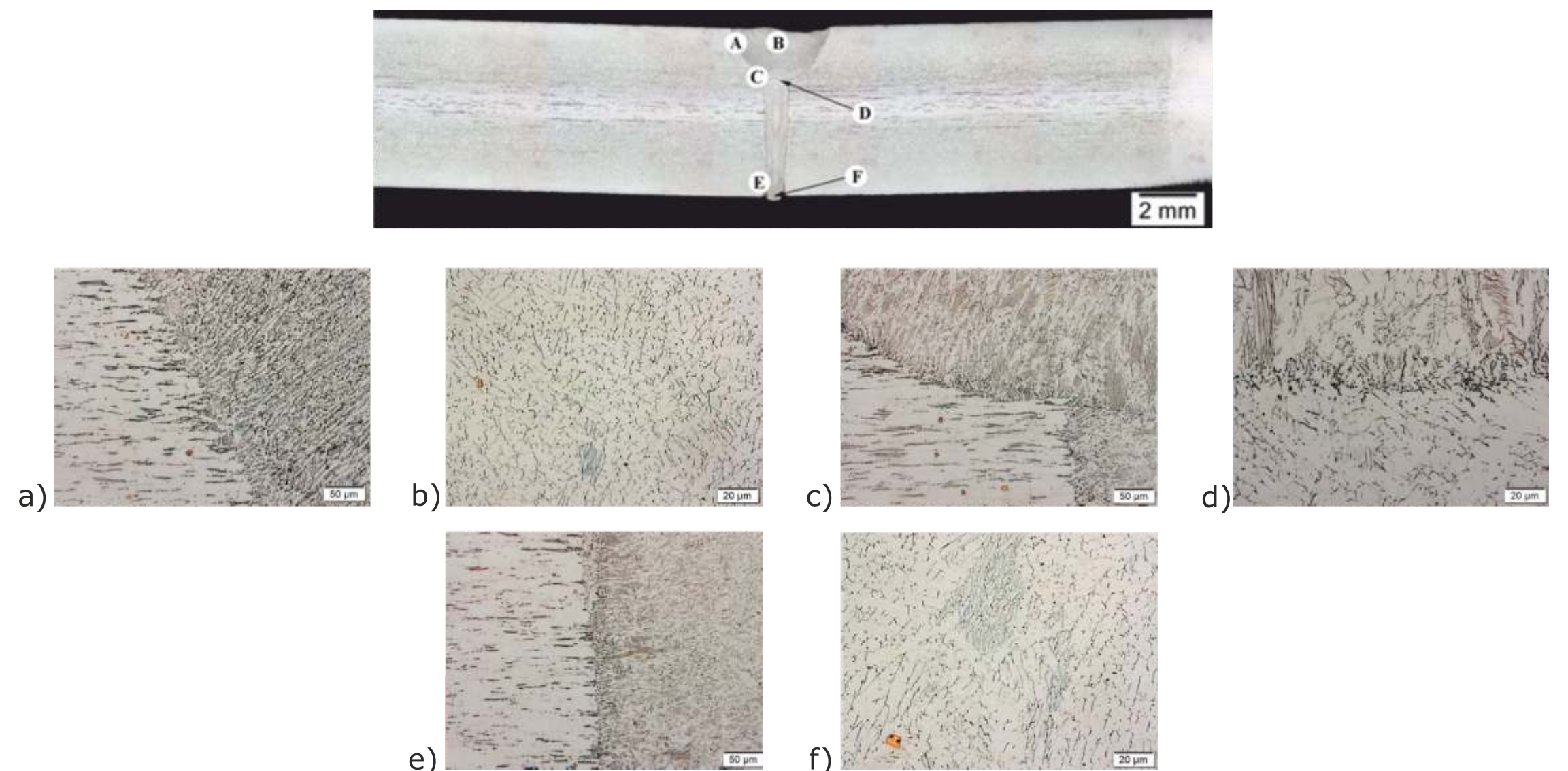
Rysunek 1. Urządzenie do spawania i modyfikowania powierzchni XW150:30/756 (CVE) – Łukasiewicz - Instytut Spawalnictwa

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	N	Fe
0,033	0,42	0,92	0,038	0,001	16,6	10,5	2,02	0,3	0,013	reszta

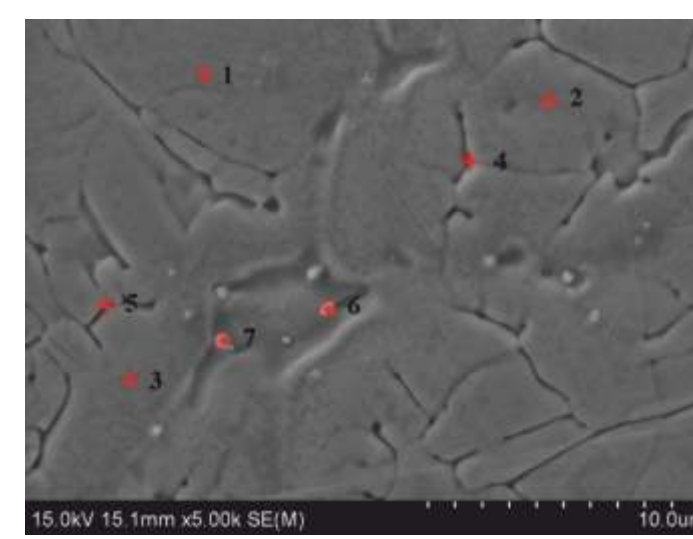
Tabela 1. Skład chemiczny stali austenitycznej 316Ti, % masy

## Wyniki badań i dyskusja

Na rysunku 2 przedstawiono makro- i mikrostrukturę złączy ze stali 316Ti wykonanego metodą spawania wiązką elektronową (EBW). W celu uzyskania poprawnego złączy wykonano spoinę oraz ścieg kosmetyczny o oscylacji kołowej. Zastosowane parametry pozwoliły uzyskać symetryczną spoinę z pełnym przetopem bez żadnych niezgodności spawalniczych. Mikrostrukturę osi spoiny złączy EBW 316Ti przedstawiają rysunki 2B (lico spoiny), 2D (środek spoiny), 2F (grani spoiny). Różnica w energii liniowej ściegów oraz w szerokości obszarów spoin spowodowała, że w lico spoiny występuje większa ilość ferrytu delta, o morfologii płytkowej w porównaniu do grani spoiny. Zaobserwować również można, że w przypadku lica spoiny (2A) występujący ferryt delta jest równoległy względem siebie natomiast na rysunku 87E brak jest wyraźnej orientacji ferrytu. Ilościowa analiza składu chemicznego (rys. 3, tabela 2) potwierdziła występowanie węglików Ti. Na podstawie badań metalograficznych stwierdzono, że zawartość ferrytu delta w spoinie wynosi 1,5 %.



Rysunek 2. Makro- i mikrostruktura złączy spawanego wiązką elektronów ze stali 316Ti

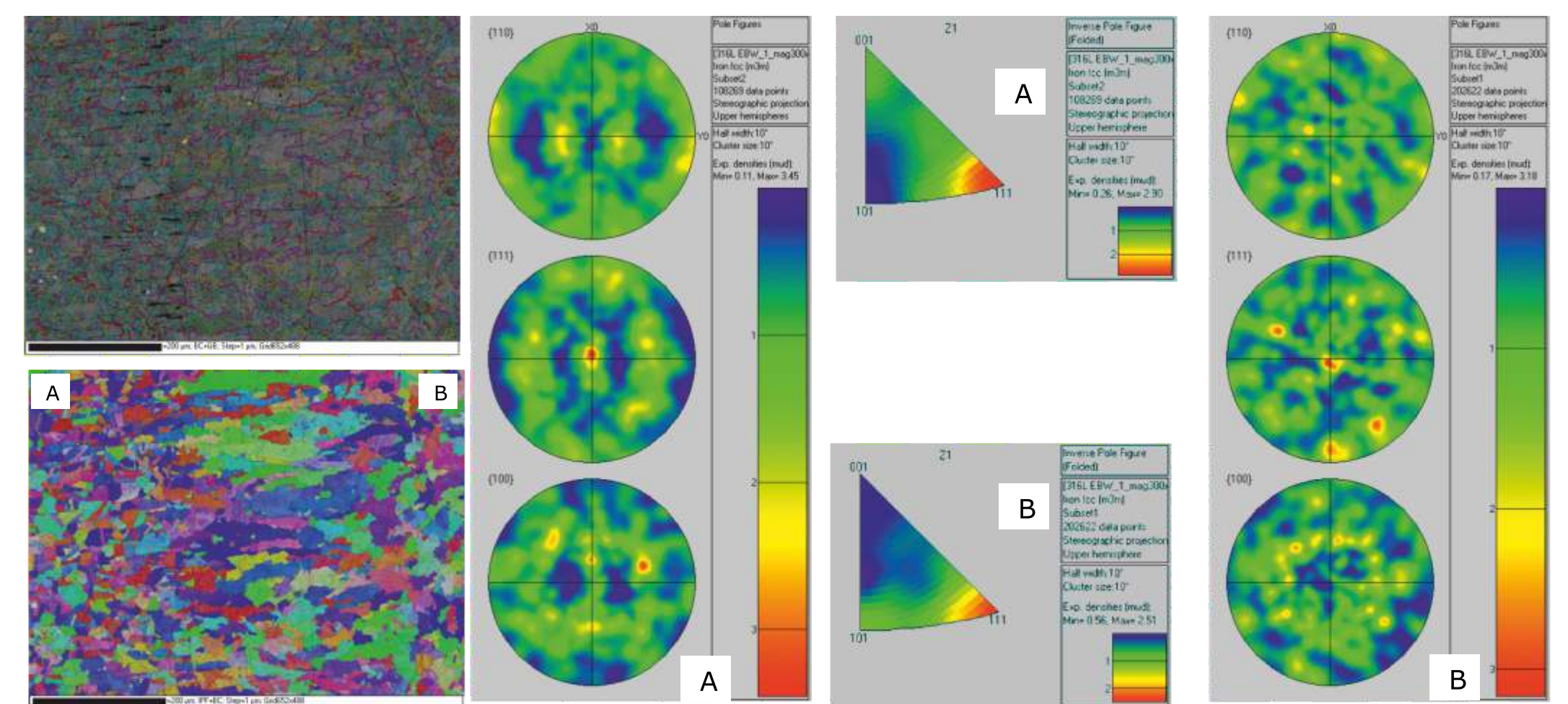


Rysunek 3. Mikrostruktura (SEM) spoiny w obszarze lica

EBW 316Ti Lico spoiny	C	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
<b>Punkt 1</b>		0.68	0.16	16.78	0.87	68.22	11.20	2.08
<b>Punkt 2</b>		0.65	0.23	16.53	1.00	67.79	11.46	2.18
<b>Punkt 3</b>		0.60	0.28	16.84	0.75	68.27	11.23	2.02
<b>Punkt 4</b>		0.41	0.28	18.05	1.00	69.47	8.98	1.82
<b>Punkt 5</b>		0.41	0.17	19.20		70.42	7.80	2.00
<b>Punkt 6</b>		20.17	0.67	15.14	12.20	0.82	37.43	7.60
<b>Punkt 7</b>		13.05	0.80	12.37	14.02	0.83	44.19	8.89

Tabela 2. Analiza składu chemicznego złączy EBW AISI 316Ti w obszarze lica spoiny, % wagowy.

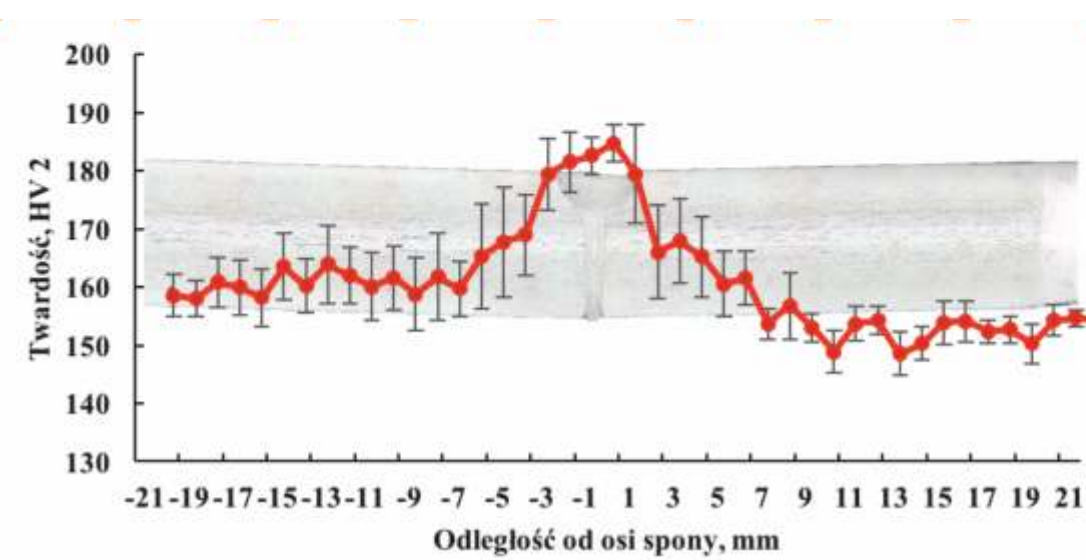
Analiza EBSD (rys. 4) wykazała, że występuje duże zróżnicowanie wielkości ziarna w materiale rodzimym, w którym średnia wielkość ziarna wynosi 20 μm, natomiast w spoinie około 36 μm. Zarówno w materiale rodzimym jak i w spoinie dominuje orientacja <111>.



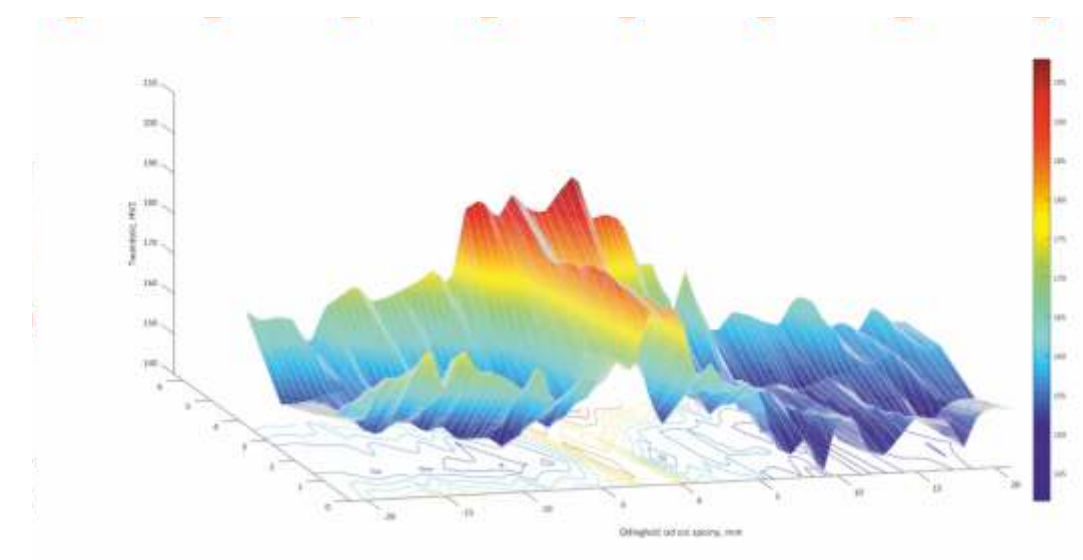
Rysunek 4. Analiza EBSD złączy spawanego wiązką elektronów ze stali 316Ti

Wytrzymałość na rozciąganie złączy osiągnęła wartość 605 MPa (średnia z trzech pomiarów), podczas gdy granica plastyczności i odkształcenie całkowite osiągnęły wartości odpowiednio 325 MPa oraz 42%. Nie stwierdzono również pęknięć na powierzchniach próbek w trakcie statycznej próby gięcia do kąta 180°.

Na rysunku 5 oraz 6 przedstawiono odpowiednio profil oraz mapę rozkładu twardości w złączy. Średnia twardość materiału wyjściowego wynosiła 160 HV. Kierując się w stronę osi spoiny wzrost twardości nastąpił w strefie wpływu ciepła, gdzie twardość wyniosła 184 HV. Najwyższą twardość osiągnięto w centralnej części spoiny, średnia twardość w tym obszarze była wyższa o 28 jednostek twardości w skali Vickersa w porównaniu do materiału wyjściowego i wyniosła 188 HV. Mapa twardości przedstawiona na rys. 6 odzwierciedla podwyższoną twardość w całym obszarze złączy w porównaniu do materiału wyjściowego, najwyższa zlokalizowana jest w obszarze lica spoiny.



Rysunek 5. Profil twardości w złączy spawanym



Rysunek 6. Mapa rozkładu twardości w złączy spawanym

## Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

- Spawanie wiązką elektronów umożliwia uzyskanie poprawnych złączy ze stali AISI 316Ti.
- Ilościowa analiza składu chemicznego potwierdziła występowanie w mikrostrukturze spoiny węglików Ti.
- Zawartość ferrytu delta w spoinie, wyznaczona w oparciu o wyniki badań metalograficznych, wynosi ok. 1,5%.
- Zarówno w materiale rodzimym jak i w spoinie dominuje orientacja <111>.
- Wytrzymałość na rozciąganie złączy osiągnęła wartość 605 MPa, co stanowi 98% wytrzymałości materiału w stanie dostawy.

## Podziękowania

W pracy przedstawiono wyniki badań, jakie zostały zrealizowane w ramach projektu finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju „Dobór materiałów oraz opracowanie konstrukcji elementów przewodów klimatyzacyjnych przeznaczonych do pracy z nowym czynnikiem chłodniczym R744”, umowa nr PBS3/B5/43/2015



Marek St. Węglowski Dr inż.  
Łukasiewicz – Instytut Spawalnictwa  
Bl. Czesława 16-18  
tel. +48 32 33 58 236  
44-100 Gliwice  
Marek.Weglowski@is.gliwice.pl



**62.**

**MIĘDZYNARODOWA  
KONFERENCJA  
SPAWALNICZA**

Nowoczesne spawalnictwo  
– nowoczesna przyszłość



INTERNATIONAL CONGRESS  
Konferencji towarzyszy  
Kongres Międzynarodowego  
Instytutu Spawalnictwa (IIW)

