

# Właściwości złączy spawanych wykonanych elektrodami zasadowymi i celulozowymi

## Properties of basic and cellulose electrode welded joints

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań kwalifikowania technologii spawania stali o podwyższonej wytrzymałości elektrodami z otuliną celulozową, zasadową oraz metodą łączoną – przetop elektroda celulozowa, warstwy wypełniające – elektroda zasadowa. Dokonano porównania właściwości wytrzymałościowych oraz przedstawiono wyniki badań mikroskopowych obrazujące zmiany mikrostruktury złączy w zależności od rodzaju zastosowanej technologii spawania.

### Abstract

The article presents the results of the qualification of welding high strength steel by cellulose, basic and combined method – penetration by cellulose electrode and fill layers – a basic electrode. A comparison of mechanical properties and the results of microscopic testing of the microstructure of joints depending on the type of technology used for welding is presented.

### Wstęp

Spawanie łukowe ręczne elektrodą otuloną, dzięki uniwersalności techniczno-technologicznej, umożliwia wykonanie połączeń o wysokich właściwościach eksploatacyjnych prawie wszystkich metalowych tworzyw konstrukcyjnych w dowolnej pozycji i trudno dostępnych miejscach. Duży wybór gatunków elektrod otulonych umożliwia spawanie stali niskowęglowych, niskostopowych o wysokiej wytrzymałości, stali specjalnych wysokostopowych, nadstopów, staliwa, żeliw szarych i sferoidalnych oraz miedzi, niklu, aluminium i ich stopów [1]. Możliwe jest również wykonanie połączeń metali i stopów różniących się znacznie właściwościami fizycznymi, np. stali węglowej ze stalą austenityczną, stali wysokostopowych z miedzią, itd. Niemożliwe jest natomiast spawanie metali, których osłona łuku elektrod otulonych nie wystarcza do zapewnienia odpowiedniej ochrony przed dostępem gazów z atmosfery (tytan, cyrkon, wolfram, niob, tantal i molibden) [1].

Spawanie ręczne elektrodą otuloną jest technologią, która wbrew opinii niektórych środowisk jest i będzie nadal stosowana, a wspólnie z technologią spawania

drutami proszkowymi jest bardzo rozpowszechniona przy wytwarzaniu odpowiedzialnych konstrukcji morskich (platformy wiertnicze) oraz trudniejszych odcinków rurociągów przemysłowych ropy lub gazu. Duży wybór gatunków elektrod otulonych dostępnych obecnie na rynku umożliwia technologom spawalnikom dobór odpowiednich rozwiązań dla danej konstrukcji. Najbardziej rozpowszechnione i uniwersalne są elektrody o otulinie zasadowej. W warunkach montażowych wytwórcy konstrukcji stalowych chętnie sięgają też po elektrody celulozowe, które mają zastąpić metodę TIG na warstwach przetopowych.

W tablicy I zestawiono właściwości elektrod o otulinie zasadowej i celulozowej, natomiast w tablicy II porównano właściwości mechaniczne tych elektrod.

Elektrody celulozowe mają ograniczone zastosowanie do wykonywania konstrukcji pracujących w niskich temperaturach. Praktycznie nie można nimi spawać elementów obciążonych dynamicznie, gdyż powoduje to niebezpieczeństwo wystąpienia pęknięć kruchych, wynikające z dużej zawartości wilgoci w stopiwie tych elektrod. Wilgoć ta nie może być usunięta, gdyż spawanie elektrodą celulozową o suchej otulinie jest praktycznie niemożliwe ze względu na niestabilny, strzelający łuk i dużą ilość wyrzucanego materiału z jeziora spawalniczego, co powoduje w tych warunkach tworzenie się głębokich podtopień, stanowiących miejsce gromadzenia się żużli,

Dr inż. Ryszard Pakos – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

**Tablica I.** Porównanie cech elektrod zasadowych i celulozowych [2, 3]  
**Table I.** Comparison of features of basic and cellulosic electrodes [2, 3]

Porównywana cecha	Elektrody z otuliną zasadową	Elektrody z otuliną celulozową
Główne składniki otuliny	węglan wapnia (CaCO <sub>3</sub> ) dostarczany do otuliny pod postacią kredy i marmuru) węglan magnezu, fluoryt (CaF <sub>2</sub> )	celuloza mączka drzewna skrobia
Łuk elektryczny	pierwiastki o małym potencjale jonizacji (Na, Ca, Mg) stabilizują jarzenie się łuku łuk zajarza się łatwo, jest elastyczny	łuk ma wysoką temperaturę, która ułatwia uzyskanie głębokiego wtopienia, mało elastyczny w przypadku suchej otuliny
Charakter stapiania elektrody	elektroda stapia się stabilnie, występuje mała liczba odprysków, charakter przejścia metalu w łuku jest grubokropłowy, niskie zadymienie w czasie spawania ułatwia obserwację jeziorka spawalniczego oraz pracę w pomieszczeniach/ konstrukcjach o ograniczonej wentylacji	elektroda topi się stabilnie, gdy utrzymywany jest krótki łuk kierowany na jeziorko, a zawartość wody w otulinie wynosi co najmniej 3%, odstępstwa powodują powstawanie dużej ilości odprysków i głębokich podtopień, w czasie spawania wydzielają się dużo dymów w wyniku wypalania składników organicznych otuliny, co znacznie utrudnia spawanie w miejscach o ograniczonej wentylacji
Wygląd spoin	spoiny mają płaski, regularny kształt, również po spawaniu w pozycjach przymusowych	płaski kształt spoin przy spawaniu w pozycji PA i PG, po spawaniu w pozycji PF ściegi są nieregularne, występuje nadmierny nadlew
Pozycje spawania	wszystkie z wyjątkiem PG, dla której stosuje się otuliny o zmodyfikowanym składzie	możliwe jest wykonywanie spoin we wszystkich pozycjach, jednak spawanie w pozycjach przymusowych jest utrudnione ze względu na dużą ilość odprysków
Zastosowanie	spawanie blach o grubych przekrojach w sztywnych konstrukcjach, spawanie stali o ograniczonej spawalności, spawanie stali o zwiększonej ilości węgla	zastosowanie prawie wyłącznie do spawania opadowego rurociągów
Odporność na pękanie	pęknięcia zimne: wysoka odporność wskutek minimalizowania ilości wilgoci w otulinie w wyniku suszenia, pęknięcia gorące: wysoka odporność wynikająca z wysokiej czystości metalurgicznej stopiwa	pęknięcia zimne: duża skłonność w przypadku grubych przekrojów spawanych wynikająca z nieusuwalnej ilości wprowadzonego wodoru do stopiwa, pochodzi on z rozkładu wilgoci w łuku elektrycznym, pęknięcia gorące: stal skłonna w przypadku obecności siarki w stopiwie
Suszenie	300÷350°C przez ok. 1÷3 h, po wysuszeniu możliwe przechowywanie w termosach przez 8 h	elektrod celulozowych nie suszy się

a w konsekwencji przyklejeń. Niezależnie jednak od wymienionych trudności, zastosowanie elektrod celulozowych w warunkach montażowych ma wiele zalet:

- możliwość spawania we wszystkich pozycjach, szczególnie pionowej z góry na dół,
- łatwość wykonania warstwy graniowej,
- możliwość wykonania ściegów przetopowych elektrodami o średnicy 4 mm i większej,
- mniejszą wrażliwość na dokładność przygotowania złącza,
- małą wrażliwość na warunki atmosferyczne,
- dużą wydajność spawania.

**Tablica II.** Porównanie właściwości mechanicznych elektrod zasadowych i celulozowych [2, 3]

**Table II.** Comparison of mechanical properties of basic and cellulosic electrodes [2, 3]

Elektroda	Rodzaj otuliny	Wielkość mechaniczna			
		R <sub>e</sub> , MPa	A <sub>5</sub> , %	KV, J	R <sub>m</sub> , MPa
Celex	C	> 390	> 22	> 70 (+20°C)	450÷550
Celex Mn	C	> 420	> 20	> 70 (+20°C)	540÷610
Fleetweld 5P	C	> 420	> 26	> 60 (-20°C)	500÷640
EB 150	B	> 420	22-32	> 65 (-40°C)	550÷620
OK 48.08	B	> 490	> 30	160 (-20°C)	> 575
OK 40.00	B	> 445	> 29	140 (-20°C)	> 540

## Badania własne

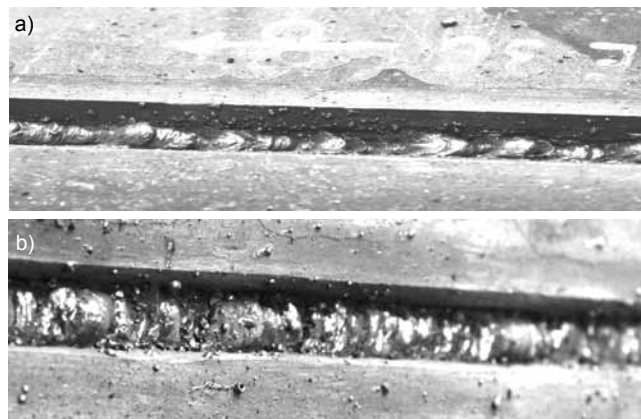
Celem przeprowadzonych badań było określenie i porównanie właściwości złączy spawanych, wykonanych ze stali EH36 o grubości 16 mm elektrodami zasadowymi (E424B42) oraz celulozowymi (Fleetweld5P – E422C25). Charakterystykę materiału podstawowego oraz elektrody celulozowej przedstawiono w [11], natomiast elektrody zasadowej w tablicy III.

Złącza próbne wykonano zgodnie z przygotowanymi wstępnie instrukcjami technologicznymi spawania (pWPS) na podstawie normatywów technologicznych i zaleceń producenta materiałów dodatkowych. W celu pełnej identyfikacji złączy wprowadzono oznaczenia płyt próbnych przedstawione w tablicy IV, które będą wiążące w dalszych badaniach.

Płyta próbna 1C-PF została wykonana w całości przy użyciu elektrod celulozowych. Charakterystyczną cechą, którą zaobserwowano przy wykonywaniu tego złącza, był sposób zachowania się łuku. Elektroda topiła się stabilnie w przypadku krótkiego łuku, jednak duża zawartość wody w otulinie (ok. 3%) powodowała powstawanie dużej ilości rozprysków i głębokich podtopień na ściankach rowka spawalniczego. Nieusuwanie tych podtopień skutkowało zaleganiem w nich żużla, a w konsekwencji możliwością pojawienia się

przyklejeń. Dlatego po wykonaniu każdego ściegu należało dokładnie zeszlifować pozostałe niezgodności, co w praktyce zwiększyło liczbę zaplanowanych ściegów i wprowadziło dużo ciepła do złącza spawanego. Widok warstwy graniowej i drugiej warstwy przedstawiono na rysunku 1.

Taka technologia spawania niekorzystnie wpłynęła na geometrię rowka, powodując jego cykliczne poszerzanie aż do warstwy licowej. W rezultacie zaobserwowano znaczne odkształcenia kątowe płyty próbnej, mimo zastosowania klamer montażowych. Technologia spawania płyty próbnej 2CB-PF zakładała wykonanie ściegu graniowego elektrodą celulozową, natomiast pozostałych ściegów – elektrodą zasadową.



**Rys. 1.** Złącze wykonane elektrodą celulozową: a) ścieg graniowy, b) druga warstwa, widoczne żużle spawalnicze na brzegach rowka  
**Fig. 1.** Joint made by cellulose electrode: a) reverse-side bead, b) second layer, visible slag on the banks of welding groove

**Tablica III.** Charakterystyka elektrody zasadowej E424B42 [9]  
**Table III.** Characteristic of basic electrode E424B42 [9]

Klasyfikacja	PN- EN 499: E 42 4 B 42 AWS A5.1: E7018	
Ogólna charakterystyka	Grubo otulona elektroda do spawania konstrukcji ze stali o podwyższonej wytrzymałości narażonych na duże obciążenia statyczne i dynamiczne (konstrukcje okrętowe, tabor komunikacyjny, maszyny budowlane itp.) Umożliwia wykonywanie spoin pachwinowych w pozycji pionowej z góry na dół.	
Pozycje spawania	PA, PB, PC, PE, PF, PG	
Prąd spawania i biegunowość	stały (+) do elektrody	
Typowy skład stopiwa	C	0,08
	Mn	1,1
	Si	0,4
Typowe właściwości mechaniczne	$R_e$	> 420
	$R_m$	550-620
	$A_5$	> 22-32
	KV [J] -40	> 65
Dopuszczenia	UDT, TÜV, BD-U PRS kat. 3 YH-10 LRS kl. 3,3Y, H15 BV kl. 3 YHH DNV kl. 3 YH10 GL kl. 3 YHH ABS kl. 3Y, 3H10	

**Tablica IV.** Oznaczenie płyt próbnych  
**Table IV.** Sample plate designation

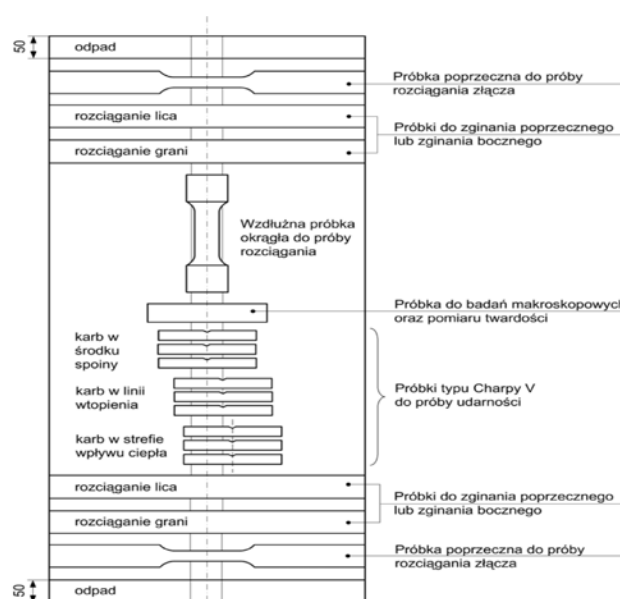
Oznaczenie płyty próbnej	Uwagi
1C-PF	Pozycja spawania PF, ścieg graniowy, wypełniający i lico wykonane elektrodami celulozowymi
2BC-PF	Pozycja spawania PF, ścieg graniowy wykonany elektrodami celulozowymi, ściegi wypełniające i lico spawane przy użyciu elektrod zasadowych
3B- PF	Pozycja spawania PF, ścieg graniowy, wypełniający i lico wykonane elektrodami zasadowymi

Nie odnotowano większych trudności przy wykonywaniu tego złącza, poza ściegiem graniowym, który wykazywał cechy opisane powyżej.

Złącze próbne 3B-PF wykonano w całości elektrodami zasadowymi. Przed rozpoczęciem spawania wysuszone elektrody w temperaturze 250÷300°C. Ze względu na mniejsze wtopienie elektrod zasadowych w stosunku do elektrod celulozowych, zastosowano szerszy odstęp między blachami. Po wykonaniu złącza otrzymano pełny przetop na całej długości, a jakość ściegu graniowego i ściegów wypełniających była zadowalająca i nie wykazywały one tendencji do tworzenia podtopień na ściankach rowka, ani też nadmiernej ilości rozprysków.

Badania technologii spawania przeprowadzono zgodnie z wymaganiami Polskiego Rejestru Statków zamieszczonymi w Publikacji Nr 74/P [6].

Rozmieszczenie próbek do badań niszczących przedstawiono na rysunku 2.



**Rys. 2.** Rozmieszczenie próbek do badań niszczących [6, 11]  
**Fig. 2.** Arrangement of samples for destructive testing [6, 11]

## Wyniki badań

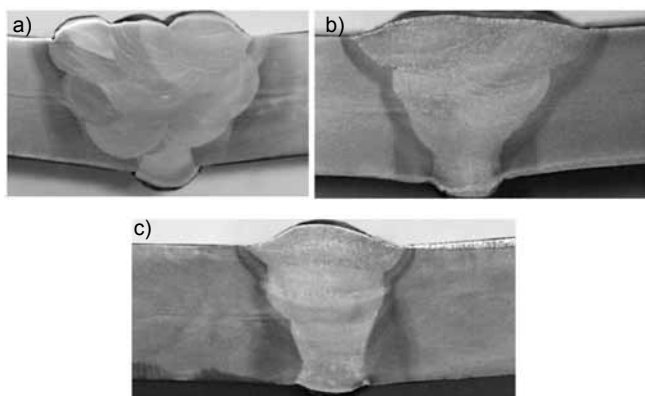
Przeprowadzone badania wizualne, magnetyczno-proszkowe oraz radiograficzne nie wykazały niedopuszczalnych niezgodności spawalniczych. Osiągnięto poziom jakości B i poziomy akceptacji 1.

Badania makroskopowe przeprowadzono zgodnie z PN-EN1321. Wytrawione odczynnikami Adlera zgłady przedstawiono na rysunku 3.

Jak wynika z tego rysunku we wszystkich próbach osiągnięto pełny przetop oraz nie zaobserwowano niedopuszczalnych niezgodności spawalniczych, z wyjątkiem dużego odkształcenia kąтового (płyta 1C-PF) w przypadku wykonania całej płyty elektrodami celulozowymi.

Cechą charakterystyczną przedstawionych zgładów metalograficznych są różnice wysokości grani, szerokości stref wpływu ciepła oraz liczby ściegów na przekroju złącza. W tabelicy V przedstawiono charakterystyczne wielkości uzyskane w wyniku badań makroskopowych.

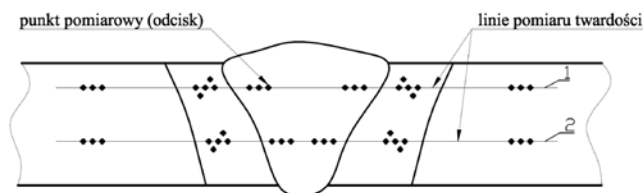
Wyniki badań wskazują, że najbardziej narażone na szkodliwe działanie ciepła są złącza wykonane elektrodami celulozowymi. Szlifowanie po spawaniu



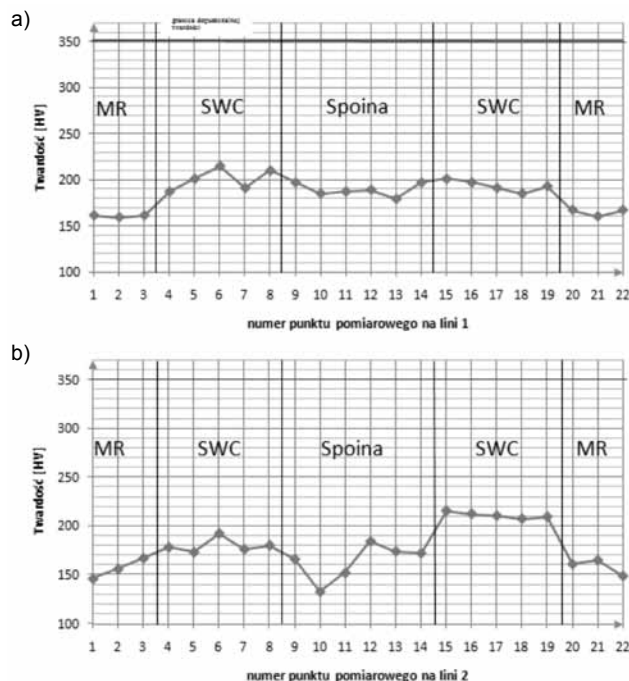
Rys. 3. Makrostruktura złączy: a) 1C-PF, b) 2CB-PF, c) 3B-PF  
Fig. 3. Macrostructure of joints: a) 1C-PF, b) 2CB-PF, c) 3B-PF

Tablica V. Liczba ściegów i pola powierzchni SWC  
Table V. Number of beads and the SWC area

Oznaczenie płyty, z której został pobrany zgład	Liczba ściegów	Powierzchnia SWC, mm <sup>2</sup>
1C-PF	11	171
2CB-PF	7	114
2B-PF	4	94



Rys. 4. Miejsca pomiaru twardości  
Fig. 4. The places of hardness testing



Rys. 5. Rozkład twardości w złączu wykonanym elektrodą celulozową i zasadową: a) 1. linia pomiarowa, b) 2. linia pomiarowa  
Fig. 5. Distribution of hardness in the joint made by cellulose and basic electrode: a) 1. measurement line, b) 2. measurement line

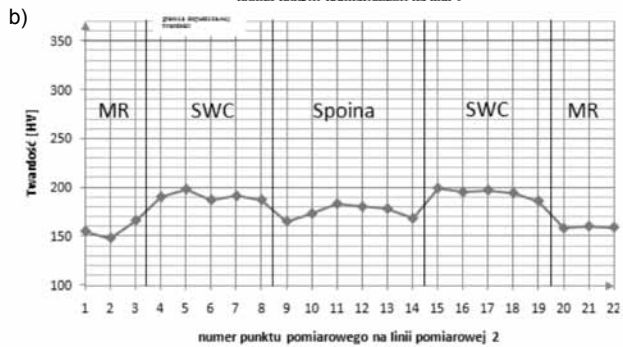
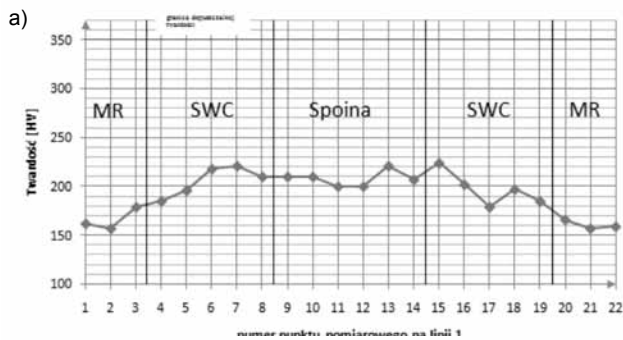
powoduje zmniejszanie przekroju wykonanego ściegu, co doprowadza do ponownego wnikiwania ciepła w wykonany obszar złącza. Efektem końcowym jest duża liczba ściegów i wyraźny rozrost szerokości strefy wpływu ciepła.

Badania twardości przeprowadzono twardościomierzem LECO LV 700AT zgodnie z normami PN-EN1043-1 i PN-EN ISO 6507-1. Pomiary na dwóch liniach pomiarowych wykonano zgodnie z rysunkiem 4.

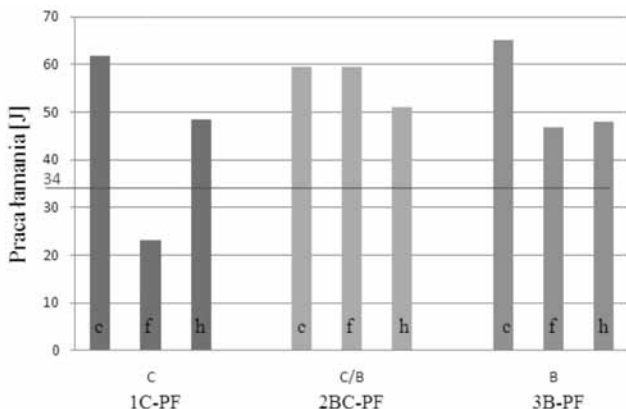
Wyniki badań uznaje się za pozytywne, jeżeli uzyskana twardość nie przekracza 350 HV10 dla stali o  $R_{eH} \leq 420$  MPa i 420 HV10 dla stali o  $R_{eH} < 690$  MPa [6]. Uzyskane wyniki badań dla elektrody celulozowej przedstawiono w [11], na rysunku 5 pokazano rozkład twardości złączy wykonanych elektrodą celulozową i zasadową, a na rysunku 6 tylko elektrodą zasadową.

Stal EH36 jest stalą kadmową o podwyższonej wytrzymałości z minimalną granicą plastyczności  $R_{eH} = 355$  MPa, stąd też zgodnie z wymaganiami, maksymalna twardość w złączu spawanym nie może przekroczyć 3650 HV10 [6].

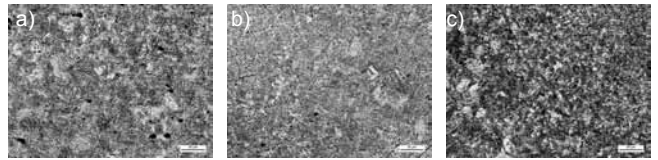
Badania udarności przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN10045-1 na próbkach typu Charpy V szerokości 10 mm. Do prób pobrano po 3 zestawy z każdej płyty próbnej (karb nacięto w środku spoiny, w linii wtopienia oraz w SWC w odległości 2 mm od linii wtopienia). Próbę wykonano w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$ . Wyniki badań przedstawiono na rysunku 7.



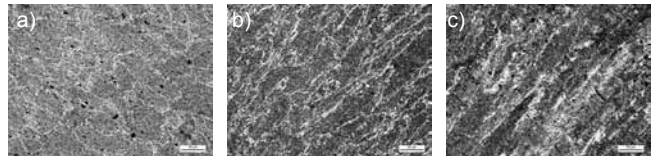
**Rys. 6.** Rozkład twardości w złączu wykonanym elektrodą zasadową: a) 1. linia pomiarowa, b) 2. linia pomiarowa  
**Fig. 6.** Distribution of hardness in the joint made by basic electrode: a) 1. measurement line, b) 2. measurement line



**Rys. 7.** Wartości średnie pracy łamania; c – spoina, f – linia wtopienia, h – HAZ  
**Fig. 7.** The average values of fracture energy; c – weld, f – fusion line, h – HAZ



**Rys. 8.** Strefa przegrzania na wysokości górnych ściegów, trawienie – nital, pow. 500x: a) 1C-PF, b) 2BC-PF, c) 3B-PF  
**Fig. 8.** Heat affected zone in the upper beads; etching: nital, magnification 500x: a) 1C-PF, b) 2BC-PF, c) 3B-PF



**Rys. 9.** Strefy kryształów dendrytycznych, trawienie – nital, pow. 500x: a) 1C-PF b) 2BC-PF c) 3B-PF  
**Fig. 9.** Zone with dendritic crystals etching; nital, magnification 500x: a) 1C-PF, b) 2BC-PF, c) 3B-PF

Negatywny wynik badania udarności uzyskała próba z płyty wykonanej elektrodą celulozową pobrana w linii wtopienia (rys. 7). Z tego powodu wykonano dodatkowe badania mikroskopowe w celu wyjaśnienia tak dużego spadku udarności w linii wtopienia przy licu spoiny. Na rysunku 8 przedstawiono strefy przegrzania płyt próbnych, natomiast na rysunku 9 pokazano obrazy stref kształtów dendrytycznych, które stykają się bezpośrednio z liniami wtopienia.

Silny rozrost ziarna (rys. 8a), jak również słabo rozbudowane dendryty (rys. 9a) świadczą o dużej ilości ciepła wprowadzonego do złącza w czasie spawania płyty elektrodą celulozową. Tym też należy tłumaczyć gwałtowny spadek udarności w linii wtopienia przy wykonywaniu złączy elektrodami celulozowymi.

## Wnioski

- Elektrody celulozowe ze względu na swoje właściwości nadają się do wykonywania warstw przetopowych w trudnych warunkach przemysłowych.
- Elektrody celulozowe nie wymagają suszenia zalecana zawartość wilgoci w otulinie wynosi ok. 3%.
- Łuk elektryczny na wilgotnych otulinach celulozowych wykazuje tendencje do głębokich penetracji i zawirowań, co odbija się głębokimi

- podtopieniami na ściankach rowka, a w konsekwencji powoduje zaleganie żużli i niebezpieczeństwo pojawienia się przyklejeń.
- Niewskazane jest wykonywanie warstw wypełniających i licowych elektrodami celulozowymi, gdyż doprowadza to do znacznego zużycia elektrod i wydłuża czas wykonania złączy.
- Właściwości wytrzymałościowe złączy wykonanych elektrodami celulozowymi charakteryzują się spadkiem udarności w warstwach licowych na linii wtopienia.

## Literatura

- [1] Klimpel A.: Technologia spawania i cięcia metali, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
- [2] Szustakowski J.: Poradnik spawacza elektrycznego, WNT, Warszawa 1985.
- [3] Praca zbiorowa, Poradnik inżyniera Spawalnictwo część I, WNT, Warszawa 2005.
- [4] Praca zbiorowa, Poradnik inżyniera Spawalnictwo część II, WNT, Warszawa 2005.
- [5] PRS: Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich, Część IX – Materiały i spawanie, Gdańsk 2008.
- [6] PRS.: Publikacja P74-P, Zasady kwalifikowania technologii spawania, Gdańsk 2007.
- [7] PN-EN 499:1997 Elektrody otulone do ręcznego spawania łukowego stali niestopowych i drobnoziarnistych.
- [8] <http://www.spawalnicze.com.pl/>, 2009.
- [9] [www.esab.pl](http://www.esab.pl), 2009.
- [10] [www.lincoln-electric.pl](http://www.lincoln-electric.pl), 2009.
- [11] Pakos R.: Ocena technologii spawania stali o podwyższonej wytrzymałości elektrodą celulozową. Przegląd Spawalnictwa 4/2011, s. 10-17.

## Sekcja Spawalnicza

### Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich Oddział Warszawski

zaprasza na organizowane przez Sekcję Spawalniczą OW SIMP wszystkich członków SIMP i NOT na:

#### ODCZYTY TECHNICZNE

Data i godzina	Prelegent, temat odczytu	Zakres tematyczny
12.05.2011 godz. 17 <sup>00</sup>	Mgr inż. JAN GRZEBALSKI <i>Nasze Spawalnictwo – DZIEŃ SPAWALNIKA</i>	Rys historyczny spawalnictwa Oddziału Warszawskiego SIMP. Spotkanie okolicznościowe
02.06.2011 godz. 17 <sup>00</sup>	Mgr inż. MAREK ŻUBROWSKI <i>Dyfuzja oraz powstawanie związków międzymetalicznych w złączach drutowych AISi1-Au</i>	Omówienie zjawiska dyfuzji oraz jej wpływu na stan naprężeń własnych po procesie spajania drutowego

Gmach Stany Technologiczny Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej, ul. Narbutta 86, sala nr ST145, dojazd tramwajami 10, 17 i 33

#### WYCIECZKI TECHNICZNE

Data i godzina	Nazwa instytucji, adres	Zakres zwiedzania / działalności
16.06.2011 godz. 11 <sup>00</sup>	Centrum Nauki Kopernik ul. Wybrzeże Kościuszkowskie 20	Laboratoria, bilet wstępu: 22 zł.

W imieniu Komitetu Organizacyjnego

serdecznie zapraszamy wszystkich absolwentów Zakładu Inżynierii Spajania do uczestnictwa

**w Seminarium Zakładu Inżynierii Spajania  
połączonym ze zjazdem absolwentów  
z okazji Jubileuszu 60-lecia Zakładu Inżynierii Spajania  
(dawniej Katedry/Zakładu Spawalnictwa)  
Politechniki Warszawskiej**

Osoby zainteresowane uczestnictwem w seminarium prosimy o kontakt:  
Seminarium odbędzie się 11.06.2011 r.

Zakład Inżynierii Spajania  
Politechnika Warszawska  
ul. Narbutta 85  
02-524 Warszawa  
tel.: 22 234 84 02  
email: [zis@wip.pw.edu.pl](mailto:zis@wip.pw.edu.pl)