

Zastosowanie technologicznej warstwy pośredniej w układach platerowanych wybuchowo na przykładzie układu cyrkon–stal

Application of a technological interlayer in the explosive welding on the example of zirconium–steel clad

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki prób związanych z doбором optymalnych parametrów procesu zgrzewania wybuchowego próbnymi płytami z cyrkonu Zr 700 o grubości 10 mm ze stalą niestopową (P265GH). Do badań przygotowano układ bimetalowy Zr–stal oraz trimetalowy Zr–Ti–stal, w którym tytan jest międzywarstwą technologiczną ułatwiającą uzyskanie połączenia. Badania prowadzono dla złączy w stanie wyjściowym, tj. bezpośrednio po zgrzewaniu wybuchowym. Poddano analizie zmiany strukturalne łączonych blach, ze szczególnym uwzględnieniem charakterystyki granicy połączenia. Wykonano badania właściwości mechanicznych otrzymanych platerów, tj. próbę ścinania, odrywania oraz zginania bocznego. Systematyczne pomiary rozkładu mikrotwardości umożliwiły analizę zjawiska umocnienia materiału w procesie zgrzewania wybuchowego, zarówno w strefie bezpośrednio przy granicy połączenia, jak i w całym przekroju plateru. Analiza uzyskanych wyników pozwoliła na ocenę wpływu zastosowania międzywarstwy technologicznej z czystego technicznie tytanu na jakość uzyskanego połączenia, tj. jego charakterystykę i właściwości wytrzymałościowe. Stwierdzono, że w przypadku platerowania cyrkonem o grubości 10 mm zastosowanie międzywarstwy technologicznej pozwala uzyskać połączenie o dobrych właściwościach mechanicznych i optymalnej charakterystyce granicy połączenia.

Słowa kluczowe: platerowanie, złącza różnorodne

Abstract

The paper presents the results of trials aimed at selecting optimal settings of the explosion welding process of 10 mm thick zirconium (Zr 700) plates with carbon steel (P265GH). A bimetal Zr–steel and trimetal Zr–Ti–steel were prepared for testing purposes, where titanium serves as a technological intermediate layer facilitating the bonding. The research was carried out for as-bonded joints, i.e. immediately following explosion welding. Structural changes of the joined sheets underwent analysis, particularly focusing on the characteristic of the joint interface. Mechanical properties of the obtained cladders were tested with shearing, peel test and lateral bending test. Systematic measurements of microhardness distribution enabled analyzing the strengthening of the material resulting from explosion welding both at the bond interface zone and throughout the whole section of the clad. The resulting analysis enabled the assessment of the impact of the application of the interlayer of pure titanium on the quality of the bond, i.e. its characteristic and strength properties. It was established that during explosion welding with 10 mm zirconium the application of the interlayer allows obtaining a joint with good mechanical properties and optimal characteristic of the interface.

Keywords: explosion welding, dissimilar joints

Dr Mariusz Prażmowski – Politechnika Opolska; **prof. dr hab. inż. Henryk Paul** – Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN, Kraków; **mgr inż. Fabian Żok** – Zakład Technologii Wysokoenergetycznych Explomet, Opole.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: m.prazmowski@po.opole.pl

Wstęp

Rozwój technologii przyjaznych środowisku oraz wzrastające wymogi dotyczące ekonomiki prowadzenia procesów technologicznych nakładają na producentów wyrobów metalowych konieczność poszukiwania nowych kompozycji materiałowych lub też nadania obecnie stosowanym materiałom nowych, lepszych właściwości. Wymagania dużej trwałości przy relatywnie niskich kosztach wytworzenia narzucają stosowanie metali reaktywnych (aluminium, tytan, cyrkon, tantal itp.), jak również ich stopów, jako warstw nakładanych w procesie wybuchowego platerowania stali. Aparaty stosowane w inżynierii procesowej, np. wymienniki ciepła lub reaktory, zawierają elementy (np. ściany sitowe), które wymagają stosowania warstwy nakładanej o relatywnie „dużej grubości”. O ile technologia platerowania blachami o grubości poniżej 8 mm jest dobrze rozpoznana [1÷3], to platerowanie tzw. *grubymi blachami* wymaga indywidualnego podejścia do każdego przypadku.

W wielu sytuacjach podczas platerowania tego typu układów wymagane jest stosowanie międzywarstwy technologicznej z innego materiału niż materiały łączące. W przypadku blach o dużej powierzchni i grubości przekraczającej 8 mm nałożenie większej masy wymaga użycia większej ilości materiału wybuchowego, czego negatywnym skutkiem może być wzrost parametrów procesu (prędkości detonacji) i tym samym wytworzenie się w złączu większej ilości warstwy przetopionej oraz silniejsze umocnienie materiału nakładanego w obszarze złącza. Konieczność stosowania międzywarstwy technologicznej związana jest także z właściwościami łączonych materiałów, które nie odgrywają większej roli w przypadku technicznie czystych metali, ale są kluczowe w przypadku stopów, np. stopów tytanu. Wyniki wstępnych prób pokazują, że połączenie tytanu Gr. 12

ze stałą bez zastosowania międzywarstwy technologicznej nie jest możliwe lub będzie wykazywało niewystarczające właściwości mechaniczne, nawet dla blachy o grubości 4 mm. W tym przypadku kluczowym zagadnieniem jest minimalizacja efektu umocnienia w obszarze połączenia.

W prezentowanej pracy podjęto problematykę platerowania stali niestopowej cyrkonem o grubości 10 mm. Analizowano jeden układ bimetalowy cyrkon-stal oraz dwa układy trimetalowe z zastosowaniem międzywarstwy technologicznej z czystego technicznie tytanu. Układy próbne zostały wykonane przez ZTW Explomet Opole przy zastosowaniu różnych parametrów procesu (prędkości detonacji i odległości początkowej pomiędzy łączonymi blachami). Przedstawiono wyniki badań mechanicznych i strukturalnych strefy złącza ze szczególnym uwzględnieniem charakterystyki granicy połączenia.

Techniki badawcze

Materiał do badań

W ramach realizowanej pracy podjęto próby wykonania układów warstwowych cyrkon-stal węglowa spajanych metodą zgrzewania wybuchowego. Materiałem nakładanym był cyrkon Zr 700 o grubości 10 mm, natomiast podstawowym stal P265GH o grubości 25 mm i 14 mm. Skład chemiczny oraz właściwości mechaniczne obydwóch materiałów przedstawiono w tablicach I i II. Proces spajania realizowano w dwóch wariantach. W pierwszym przypadku podjęto próby wykonania bimetalu w układzie cyrkon-stal bez zastosowania międzywarstwy technologicznej. W wyniku przeprowadzonych prób zgrzewania wybuchowego uzyskano próbkę (A), dla której nastąpiło trwałe połączenie na powierzchni ok. 30÷40% wykonanej płyty próbnej.

Tablica I. Skład chemiczny łączonych blach wg atestu dostawcy, % wag.

Table I. The chemical composition of joined metal sheets, as per the supplier's certificate, wt. %

Materiał	C		Fe		H	O	Zr + Hf		N		
Zr 700	0,004		0,06 (FeCr)		< 0,003	0,067	> 99,2		< 0,002		
Ti Gr.1	0,020		0,02		0,010	0,070	-		< 0,01		
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	N	NB
P265GH	0,147	0,959	0,260	0,011	0,006	0,030	0,022	0,005	0,051	0,004	0,008

Tablica II. Właściwości mechaniczne blach stalowych w stanie wyjściowym wg atestu dostawcy

Table II. Mechanical properties of steel plates as per the manufacturer's certificate

Materiał	Granica wytrzymałości R_m , MPa	Granica plastyczności $R_{0,2}$, MPa	Wydłużenie A, %
Zr 700	308	150	38,0
P 265 GH	467	346	25,6
Ti Gr.1	340	240	36,0

Ponieważ otrzymane wyniki były niezadowalające, podjęto próbę wykonania układu 3-warstwowego z technologiczną międzywarstwą wykonaną z tytanu (Ti Gr.1) o grubości 2 mm (próbki B i C). Układ ten (dla którego uzyskano poprawne połączenie) wykonano w dwóch etapach. W pierwszym wykonano połączenie w układzie: technologiczna międzywarstwa (Ti Gr.1) i materiał podstawowy (stal). W drugim wykonany bimetal połączono z materiałem nakładanym (cyrkon Zr 700, grubość 10 mm). Parametry procesu oraz oznaczenie układów przedstawiono w tabelicy III.

W obydwu przypadkach płyty próbne, o wymiarach 300 x 500 mm, wykonano w układzie równoległym. Zastosowano prędkości detonacji V_D w dolnym zakresie parametrów, tj. 1900÷2500 m/s. W przypadku układów trójwarstwowych zastosowano zróżnicowane parametry odległości h pomiędzy łączonymi blachami. W obydwu przypadkach podczas spajania materiału podstawowego (stal) z materiałem międzywarstwy technologicznej (titan) odległość wynosiła 4 mm. Spajanie materiału nakładanego (cyrkon) z przygotowanym bimetalem Ti-stal przeprowadzono, stosując dwie odległości początkowe: dla próbki B wynosiła ona 10 mm, natomiast dla próbki C, podobnie jak w przypadku próbki A, odległość ta była równa 15 mm.

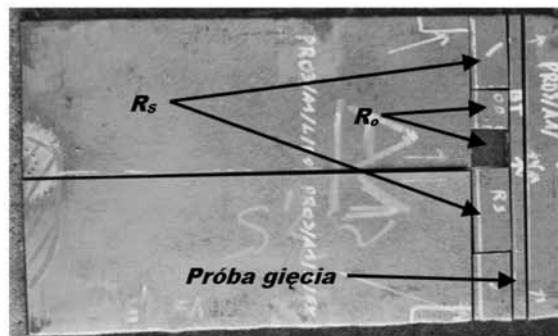
Badania ciągłości złącza i właściwości mechanicznych

Dla wykonanych układów próbnych jakość otrzymanego połączenia analizowano przez wykonanie zarówno badań nieniszczących, jak i testów niszczących zgodnych z PN-EN 13445-2 [4]. Przytoczona norma nakazuje wykonanie badań ciągłości złącza z wykorzystaniem metod ultradźwiękowych oraz badania właściwości mechanicznych i technologicznych obejmujących próbę ścinania, odrywania, rozciągania oraz gięcia poprzecznego. Do badań właściwości mechanicznych wykorzystano tylko materiał z tych prób, dla których wielkość połączonej powierzchni umożliwiała

jego pobranie. Widok płyty zgrzewanej wybuchowo z zaznaczonym miejscem pobrania próbek do badań mechanicznych przedstawiono na rysunku 1.

Badania ultradźwiękowe

Badania ultradźwiękowe wykonano zgodnie z ASTM A 578/A 578M-96 [5] i PN-EN 10160-1 [6] na powierzchni płyty zgrzewanej wybuchowo od strony materiału nakładanego. Pomiarem została objęta cała powierzchnia plateru zarówno bezpośrednio po zgrzewaniu, jak i po operacji prostowania. Badania wykonano przy użyciu defektoskopu ultradźwiękowego Starmans DiO 652LC z głowicą ultradźwiękową podwójną MSEB 4 o średnicy przetwornika 10 mm. Jako środek sprzęgający stosowano roztwór koloidalny skrobi. W zależności od rodzaju badanego układu (grubość materiału podstawowego, układ dwu- czy trójwarstwowy) stosowano różne zakresy pomiarowe S_B (50÷75 mm) oraz wzmocnienie rejestracji V_R (od 6÷38 dB). Wartości parametrów S_B i V_R dla poszczególnych układów zamieszczono w tabelicy IV. Do badań wykorzystywano metodę echa dna. Oznaczenie identyfikowanych obszarów nieciągłości przedstawiono na rysunku 2, a uzyskane wyniki w tabelicy IV.



Rys. 1. Płyta bimetalowa z miejscem pobrania próbek do badań mechanicznych: wytrzymałość na ścinanie – R_s , wytrzymałość na odrywanie – R_o .

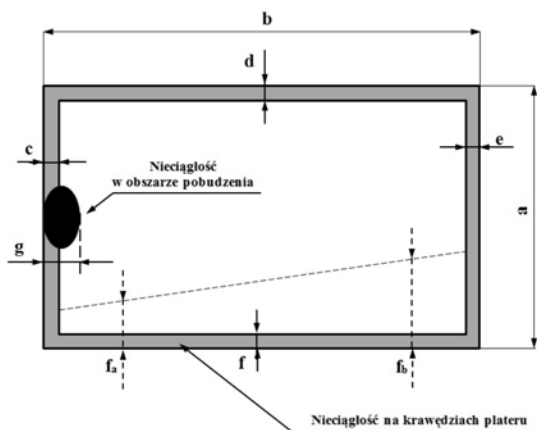
Fig. 1. Bimetal plate showing the spot of sampling for mechanical tests: shearing resistance – R_s , peeling resistance – R_o .

Tablica III. Oznaczenie płyt bimetalowych (Zr700 / P265GH) i trimetalowych (Zr700 / Ti Gr.1 / P265GH) oraz parametry procesu
Table III. Denominations of bimetal (Zr700 / P265GH) and trimetal (Zr700 / Ti Gr.1 / P265GH) plates and process parameters

Nr próbki	Materiał nakładany $g = 10$ mm	Technologiczna warstwa pośrednia $g = 2$ mm	Materiał podstawowy G	Prędkość detonacji V_D m/s	Odległość płyt h , mm
A	Zr 700	X	P265GH ($g=25$ mm)	1900	15
B	Zr 700	Ti Gr. 1	P265GH ($g=14$ mm)	2500	4/10
C	Zr 700	Ti Gr. 1	P265GH ($g=14$ mm)	2500	4/15

Tablica IV. Parametry oraz wyniki badań ultradźwiękowych ciągłości połączenia
Table IV. Parameters and ultrasonic test results of the joint continuity

Oznaczenie	Materiał nakładany + przekładka + podstawowy	SB mm	VR dB	Wymiary płyt mm		Wymiary nieciągłości mm				
				$g_1+g_2+g_3$	$a \times b$	c	d	e	f	g
A	Zr 700+ P265 GH	75	6	25 + 10	460 x 260	70	20	20	160	0
B	Zr 700+Ti Gr.1 + P265 GH	50	38	14 + 2 + 10	495 x 305	35	35	30	50	70
C	Zr 700+Ti Gr.1 + P265 GH	50	38	14 + 2 + 10	495 x 305	30	20	45	150/45	80

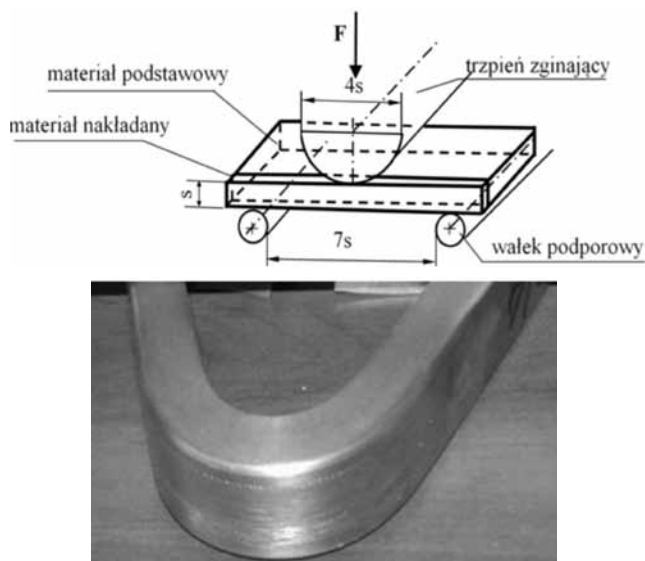


Rys. 2. Oznaczenie obszarów nieciągłości w badanych platerach: obszar szary (c, d, e, f) – strefa tzw. marginesu technologicznego, g – obszar nieciągłości związany z punktem pobudzenia, f_a i f_b – nieciągłości w obszarze prawidłowego połączenia

Fig. 2. Marking of discontinuity regions in the tested clad: grey area (c, d, e, f) the region of so called working margin, g – discontinuity region linked to the initiation point, f_a and f_b – discontinuities in the 'correct' joint area

Technologiczna próba gięcia

W przypadku materiałów warstwowych przepisy nie dopuszczają rozwarstwienia w strefie połączenia, stąd też kolejną próbą przewidzianą w normach (PN-EN 13445-2 [4]), mającą na celu ocenę jakości granicy połączenia była próba zginania bocznego. Do badań zastosowano próbki płaskie o przekroju 10 x g mm i długości 200 mm, pobrane prostopadłe do kierunku propagacji fali detonacyjnej. Całkowita grubość g jest sumą grubości blachy nakładanej g₁, grubości technologicznej międzywarstwy g₃ (w przypadku układów trójwarstwowych) oraz grubości materiału podstawowego g₂. Próbkę poddano zginaniu o kąt 180°, na trzpieniu o średnicy d = 40 mm, według schematu przedstawionego na rysunku 3a. Próbkę tę przeprowadzono dla wszystkich badanych platerów. Przykłady próbek po wykonanym badaniu na zginanie przedstawiono na rysunku 3b.



Rys. 3. Próba zginania bocznego: a) schemat badania, b) bimetal cyrkon-stal po próbie

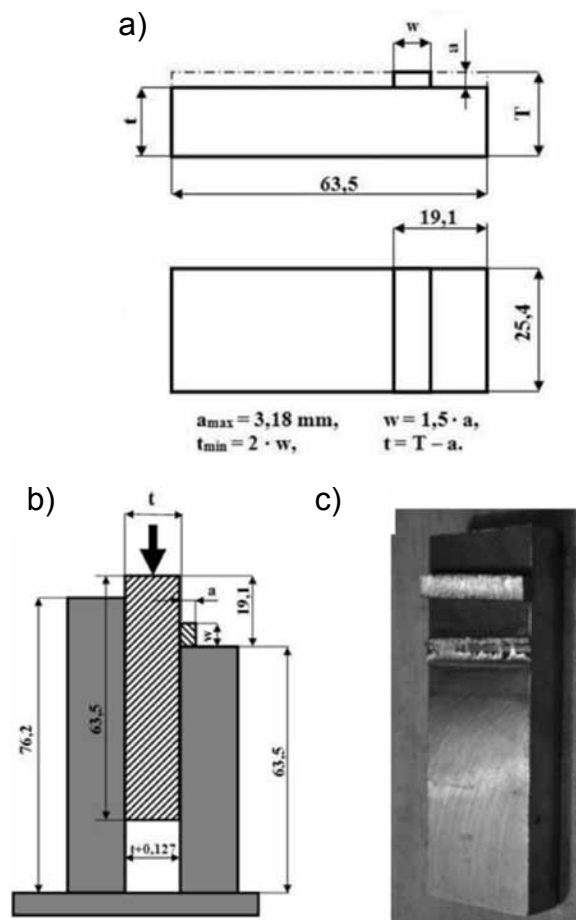
Fig. 3. Lateral bending test: a) test chart, b) bimetal zirconium-steel after the test

Badanie wytrzymałości na ścinanie

W celu oceny wytrzymałości złącza przeprowadzono próbę ścinania zgodnie z ASTM B 898-11 [7]. Próbkę do badań pobrano w taki sposób, aby płaszczyzna ścinania była równoległa do kierunku propagacji fali detonacyjnej, a następnie wykonano je zgodnie z EN 13445-2 [4]. Kształt i wymiary próbek przedstawiono na rysunku 4a. Próbkę z układów dwu- i trójwarstwowych wykonano przez frezowanie warstwy nakładanej oraz materiału podstawowego, przy czym w przypadku układów trójwarstwowych badania realizowano w dwóch wariantach. W pierwszym przypadku prowadzono próbę ścinania na granicy: materiał nakładany-technologiczna międzywarstwa, w drugim: technologiczna międzywarstwa-materiał podstawowy. Schemat realizacji próby ścinania przedstawiono na rysunku 4b, natomiast efekt końcowy (próbka ścięta) na rysunku 4c. Próbkę prowadzono do całkowitego rozdzielenia materiału, rejestrując maksymalną siłę, przy której to nastąpiło. Wytrzymałość na ścinanie wyznaczono z zależności (1):

$$R_s = \frac{F_{max}}{S}, \frac{kN}{mm^2} \quad (1)$$

Dodatkowo dla każdej próbki przeprowadzono obserwacje makroskopowe mające na celu określenie miejsca ścinania.



Rys. 4. Próba ścinania: a) kształt i wymiary próbki, b) schemat próby, c) próbka po badaniu

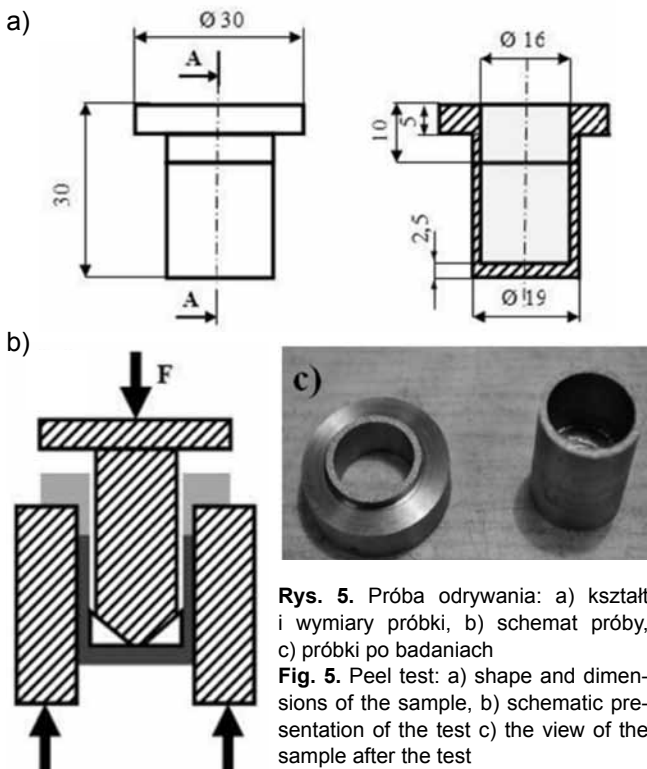
Fig. 4. Shearing test: a) shape and dimensions of the sample, b) schematic presentation of the test c) sample after the test

Badanie wytrzymałości na odrywanie

Przewidziana przez normę próba zginania może być w wielu przypadkach obarczona dużym błędem, co wynika z falistego charakteru połączenia. Dlatego w celu oceny odporności na rozwarstwienie dodatkowo przeprowadzono próbę odrywania i określenia wartości R_o . Kształt i wymiary próbki oraz sposób przeprowadzenia próby odrywania przedstawiono na rysunku 5. W przypadku układów trójwarstwowych badania realizowano w dwóch wariantach. W pierwszym przypadku prowadzono próbę odrywania na granicy: materiał nakładany–technologiczna międzywarstwa, w drugim: technologiczna międzywarstwa–materiał podstawowy. W przypadku tej próby również obserwowano (makroskopowo) miejsce, w którym nastąpiło oderwanie. Najczęściej dla bimetalu o dużej wytrzymałości miejsce zniszczenia jest ulokowane w materiale nakładanym lub podstawowym, tzn. w materiale o mniejszej wytrzymałości. Zniszczenie próbki na granicy połączenia świadczy o niskich właściwościach wytrzymałościowych badanego plateru. Na rysunku 5b przedstawiono przykład próbki, która uległa zerwaniu na granicy połączenia.

Podczas próby odrywania realizowanej według schematu przedstawionego na rysunku 5b rejestrowano wartość siły maksymalnej F_{max} przy której nastąpiło zniszczenie próbki. Wartość wytrzymałości na odrywanie R_o wyznaczono z zależności (2).

$$R_o = \frac{F_{max}}{S}, \frac{kN}{mm^2} \quad (2)$$

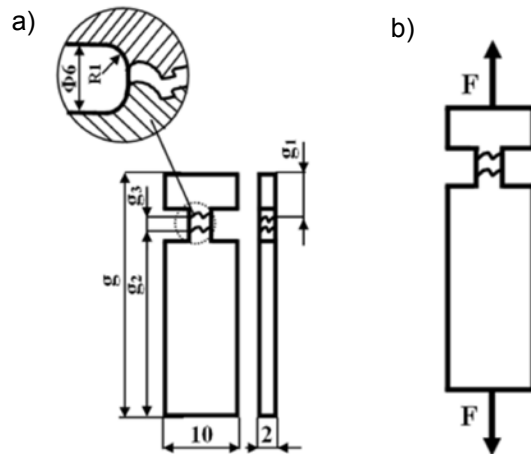


Rys. 5. Próba odrywania: a) kształt i wymiary próbki, b) schemat próby, c) próbki po badaniach

Fig. 5. Peel test: a) shape and dimensions of the sample, b) schematic presentation of the test c) the view of the sample after the test

Badanie wytrzymałości na rozciąganie

Kolejną standardową próbą badania jakości blach platerowanych jest próba wytrzymałości na rozciąganie. Przeprowadzono ją na próbkach o kształcie i wymiarach przedstawionych na rysunku 6. Wartość wytrzymałości na rozciąganie, dla każdego z układów, określono na podstawie wartości średniej z trzech prób. Dla układów bi- i trimetalowych wykonano próbki o wymiarach $g \times 10 \times 2$ mm, w których wymiar g jest sumą grubości materiałów łączonych. (rys. 6a). Przewężenie próbki wykonano za pomocą frezu walcowego o średnicy $\varnothing 6$ mm z promieniem naroża $R = 1$ mm. Próby wytrzymałości na rozciąganie R_m przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 3382 (maks. zakres obciążenia głowicy – 100 kN) według schematu pokazanego na rysunku 6b.



Rys. 6. Próba wytrzymałości na rozciąganie R_m : a) kształt i wymiary próbki, b) schemat badania

Fig. 6. Tensile strength test: a) shape and dimensions of the sample, b) schematic presentation of the test

Badanie makroskopowe granicy połączenia – mikroskopia optyczna

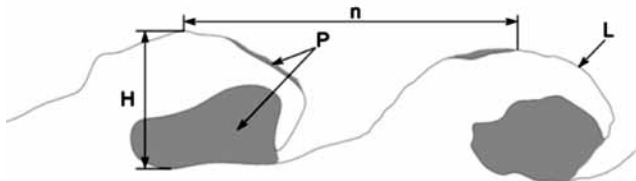
Z blach wyjściowych oraz z układów po zgrzewaniu pobrano materiał do badań mikroskopowych. W przypadku platerów zglądy metalograficzne wykonano na przekroju prostopadłym do powierzchni blachy oraz równoległe do kierunku przemieszczania się fali wybuchu. Zglądy przygotowano przez szlifowanie i polerowanie mechaniczne (papiery ściernie oraz pasty diamentowe o zmniejszającej się gradacji), a następnie polerowano je i trawiono elektrolitycznie na polerce ElectroPol 5 z zastosowaniem elektrolitu A3 firmy StruersTM.

Tak przygotowane zglądy poddano obserwacjom przy użyciu mikroskopu optycznego Olympus IX 70. W badaniach tych analizowano zmiany strukturalne, jakie następują w strukturze łączonych materiałów, oraz scharakteryzowano parametry opisujące granicę połączenia, które posłużyły także do ilościowego ujęcia udziału warstwy przetopień na linii złącza. W celu określenia charakterystyki granicy rozdziału łączonych płyt przeprowadzono pomiary długości linii złącza (L), wysokości (H) i długości (n) fali oraz pola powierzchni przetopień (P_i) (rys. 7). Na podstawie uzyskanych średnich wartości tych parametrów określono za

pomocą równania (3) współczynnik RGP określający tzw. równoważną grubość przetopień.

$$RGP = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{L}, \mu\text{m}$$

gdzie: P_i – powierzchnia obszarów przetopionych [μm^2], L – długość linii złącza [μm]



Rys. 7. Podstawowe parametry złącza: H – wysokość fali, L – długość linii złącza, n – długość fali, P – pole powierzchni przetopień
Fig. 7. Basic bond parameters: H – wave height, L – length of the bond line, n – wave length, P – fusion surface area

Badanie mikrotwardości

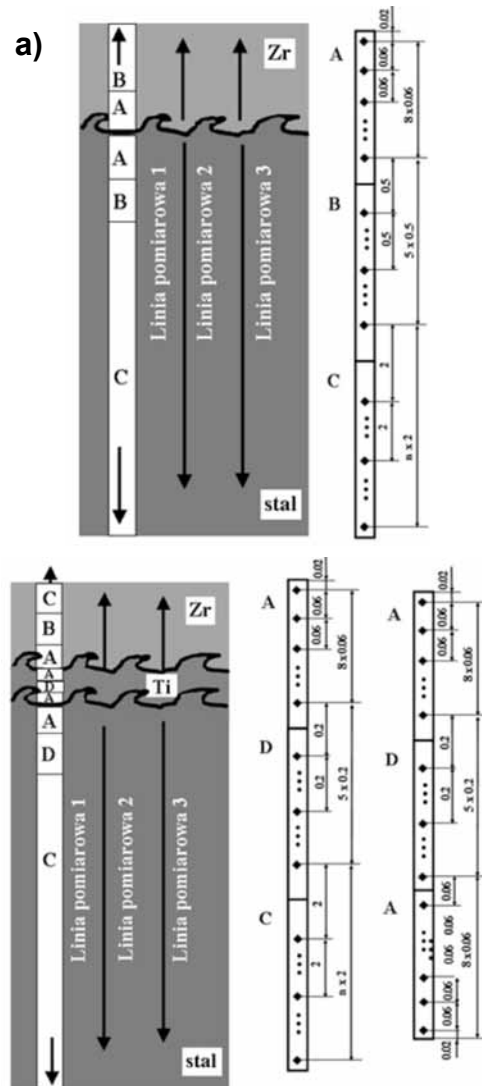
Zmiany w rozkładzie umocnienia w poszczególnych warstwach w pobliżu strefy połączenia, na przekroju wzdłużnym łączonych płyt, analizowano drogą systematycznych pomiarów mikrotwardości metodą Vickersa, z wykorzystaniem mikrotwardościomierza Leco MHT Series 200. Pomiary wykonywane były wzdłuż linii prostopadłej do granicy połączenia (3 serie), wg schematu pomiarowego przedstawionego na rysunku 8a – dla bimetalu i rysunku 8b – dla układów trójwarstwowych. Odciski wykonywano od granicy połączenia, poza obszarami przetopień, lokalizując pierwszy pomiar w odległości 0,02 mm od dna fali dla każdego z materiałów układu. Badania przeprowadzono zgodnie z wytycznymi w ISO 6507-3:1996 [8], stosując obciążenie 50 G. Przedstawione w pracy wyniki są wartością średnią z trzech równoległych pomiarów.

Analiza wyników pomiarów

Obserwacje strukturalne

Obserwacje mikrostruktury przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej. Na rysunku 9a przedstawiono strukturę blachy Zr700 (na przekroju wzdłużnym) w stanie wyjściowym, tj. przed procesem spajania. Dobrze uwidoczniono, że materiał ten charakteryzuje się w przybliżeniu równoosiową strukturą 'ukierunkowanych pakietów' o wielkości 70÷170 μm , składających się z ziaren fazy α .

Na rysunku 9b przedstawiono strukturę materiału podstawowego, tj. stali niestopowej P265GH przed procesem zgrzewania. Materiał ten charakteryzował się układem równoosiowych ziaren o wielkości z zakresu 4÷11 μm dla perlitu oraz 10÷20 μm dla ferrytu. W przypadku perlitu możemy zaobserwować pasmowy układ rozdrobnionych ziaren, typowy dla materiałów po przeróbce plastycznej na gorąco. Materiał technologicznej



Rys. 8. Schemat pomiaru twardości z podanymi wartościami odległościami pomiędzy punktami pomiarowymi dla: a) bimetalu, b) trimetalu

Fig. 8. The scheme of microhardness measurements with distances provided between points for: a) bimetal and b) trimetal

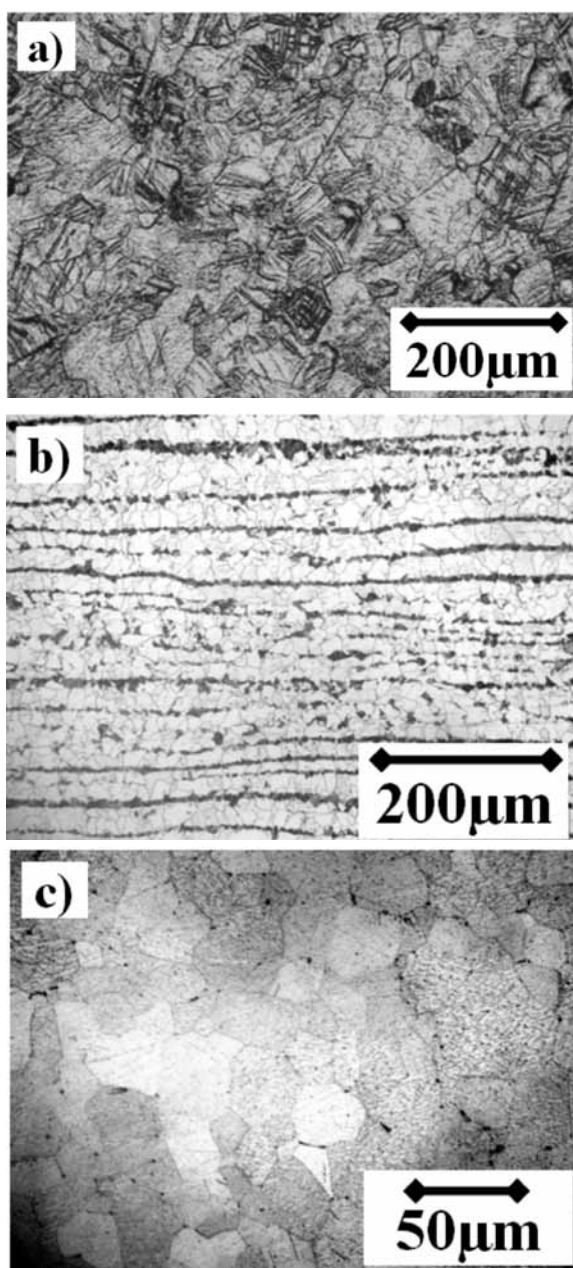
międzywarstwy (Ti Gr. 1) również charakteryzował się strukturą równoosiowych ziarnem fazy Ti – α o wielkości z zakresu 20÷40 μm (rys. 9c). Mikrostruktura blach przed procesem zgrzewania wybuchowego charakteryzowała się stanem w pełni zrekrytalizowanym.

Dla układów platerowanych cyrkonem o grubości 10 mm, do których zastosowano technologiczną międzywarstwę z czystego technicznie tytanu, przeprowadzono analizy charakterystyki granicy połączenia Zr-Ti oraz Ti-stal (próbki B i C). Dla układu A (połączenie bez warstwy technologicznej) wyznaczono charakterystykę złącza Zr-stal. Szczegółowe wyniki pomiarów przedstawiono w tabelicy V.

Analiza otrzymanych wyników wykazała, że dla układu cyrkon-stal, bez technologicznej międzywarstwy, uzyskano połączenie o współczynniku RGP na poziomie 0,52 μm , co świadczy o niewielkim udziale obszarów przetopionych. Przekłada się to na wysokie właściwości wytrzymałościowe bimetalu. W przypadku próbki A otrzymano najmniejsze z trzech analizowanych

Tablica V. Parametry granicy połączenia w układach platerowanych cyrkonem o grubości 10 mm
Table V. Parameters of the joint interface in 10mm zirconium clad structures

Nr próbki	Długość linii złącza L, mm	Średnia wysokość fali H, mm	Średnia długość fali n, mm	Sumaryczne pole powierzchni przetopień P, mm ²	Równoważna grubość przetopień RGP mm	Granica połączenia
A	11 143	61	662	5 791	0,52	Zr-stal
B	16 795	231	1 032	16 918	1,01	Zr-Ti
	13 139	95	669	59 165	4,50	Ti-stal
C	21 831	300	1 122	70 788	3,25	Zr-Ti
	11 492	81	525	73 549	6,40	Ti-stal



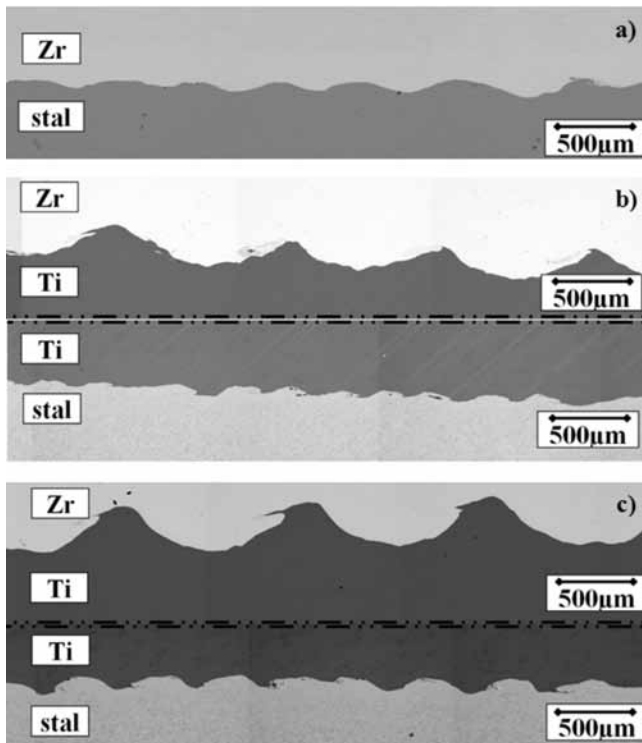
Rys. 9. Struktura materiałów w stanie wyjściowym: a) cyrkon Zr 700 – obraz w świetle spolaryzowanym, b) stal P265 GH, c) tytan Ti Gr. 1
Fig. 9. The initial microstructure of: a) Zr 700 – polarized light image, b) steel P265GH, c) titanium Ti Gr. 1

przypadków parametry złącza – średnia długość fali wynosi 662 μm , a amplituda 61 μm . Zastosowanie międzywarstwy technologicznej i wzrost prędkości detonacji o 30% (próbka C), przy takiej samej odległości początkowej 15 mm, spowodowało wzrost parametrów fali. W próbce C długość fali wzrosła o 70%, natomiast wysokość 4,5-krotnie (z 61 μm do 300 μm) w stosunku do próbki B. Obserwujemy również wzrost udziału warstwy przetopionej w złączu od wartości RGP = 0,52 μm dla próbki B do RGP = 3,25 μm dla próbki C, jednak wartość ta jest akceptowalna z punktu widzenia jakości połączenia.

W przypadku trimetali (B i C) można zaobserwować, że wraz ze wzrostem odległości początkowej pomiędzy blachą z cyrkonu a płytą Ti-stal, wzrastają parametry fali formującej się na granicy połączenia Zr-Ti. Zwiększenie odległości o 50% (z $h = 10$ mm do $h = 15$ mm) spowodowało 30% wzrost amplitudy fali oraz 3-krotne zwiększenie udziału obszarów przetopionych w złączu (wzrost wartości współczynnika RGP z 1,1 μm dla próbki B do 3,25 μm dla próbki C). Jednak, największy udział obszarów przetopionych zanotowano na granicy połączenia Ti-stal, tj. RGP = 4,5 μm . Wzrost współczynnika RGP determinował obniżenie wytrzymałości połączenia. Potwierdzono to w próbie odrywania (zniszczenie próbki nastąpiło na granicy Ti-stal). Na rysunkach 10a÷10c przedstawiono zdjęcia mikroskopowe strefy połączenia analizowanych układów.

Badania właściwości mechanicznych

W przypadku układów platerowanych blachą cyrkonową o grubości 10 mm można zauważyć, że zarówno połączenie uzyskane bez zastosowania międzywarstwy technologicznej (próbka A), jak również układy z międzywarstwą technologiczną z czystego technicznie tytanu (próbki B i C) osiągnęły wysokie właściwości wytrzymałościowe. Testy przeprowadzono w próbach wymaganych przez normę dla materiałów zgrzewanych wybuchowo, tj. wytrzymałość na ścinanie R_s i odrywanie R_o . We wszystkich przypadkach zniszczenie materiału nastąpiło w miejscu połączenia. W próbie odrywania R_o dla układów trójwarstwowych słabsza okazała się granica połączenia tytan-stal,



Rys. 10. Charakterystyka strefy połączenia bi- i tri-metali platerowanych cyrkonem o grubości 10 mm: a) obraz granicy połączenia Zr-stal – próbka A, b) granica połączenia Zr-Ti oraz Ti-stal – próbka B, c) obszar połączenia Zr-Ti i Ti-stal – próbka C

Fig. 10. The characteristics of the bond zone of bi- and tri- metals clad with 10 mm zirconium: a) image showing microstructure of the Zr-steel joint interface – sample A, b) Zr-Ti and Ti-steel bond interface – sample B, c) bond zone Zr-Ti and Ti-steel – sample C

lecz w obydwu przypadkach jej wytrzymałość przekraczała 350 MPa. W próbie ścinania większą wytrzymałość wykazało połączenie tytan-stal; wartości R_s dla próbek B i C wyniosły ok. 470 MPa. W obydwu przypadkach podczas łączenia materiału podstawowego z międzywarstwą technologiczną z tytanu zastosowano jednakową odległość początkową $h = 4$ mm (pierwszy akt strzałowy). W drugim akcie strzałowym łączono materiał nakładany (Zr700) z wcześniej przygotowanym bimetalem (Ti-stal). W tym przypadku zastosowano dwie odległości początkowe pomiędzy łączonymi płytami. W przypadku próbki B odległość ta wynosiła 10 mm, natomiast dla próbki C zastosowano odległość równą 15 mm. Dla tak dobranych odległości zaobserwowano

podobną tendencję, jak w przypadku układów bimetalowych. Dla większej odległości początkowej (próbka C) zanotowano wyższą wytrzymałość na ścinanie $R_s = 450$ MPa, natomiast dla odległości mniejszej (próbka B) wartość ta wynosiła $R_s = 380$ MPa, co daje 20% spadek wytrzymałości. Szczegółowe wartości wytrzymałości uzyskane dla poszczególnych układów przedstawiono w tabelicy VI.

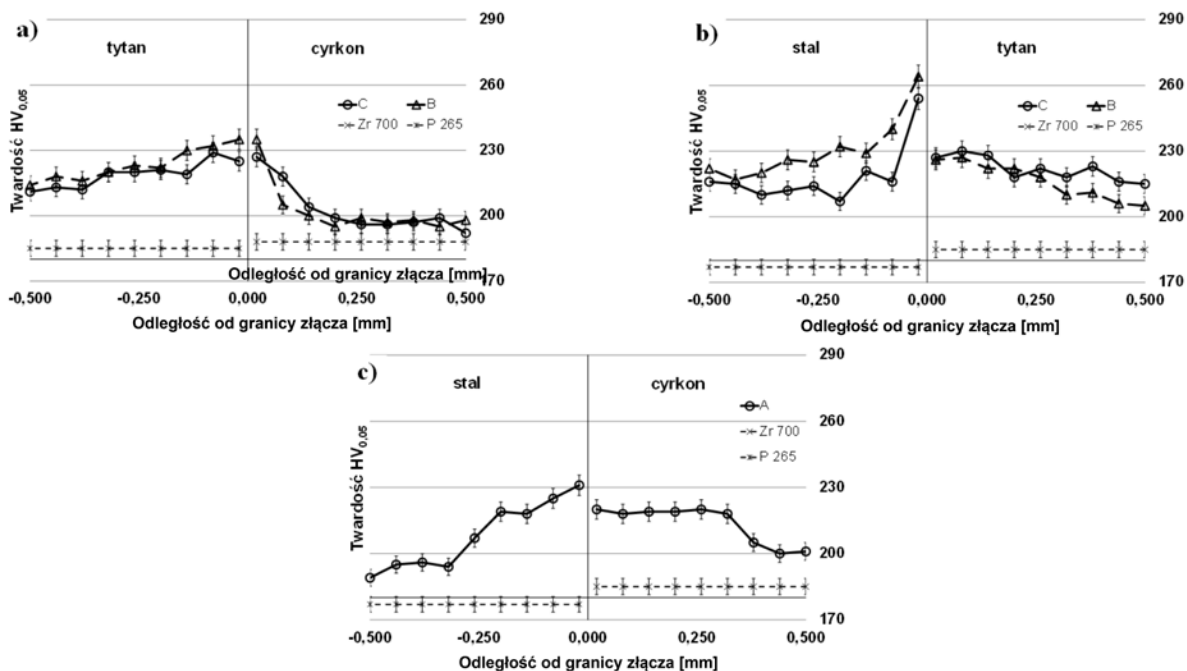
Pomiary mikrotwardości

Zmiany w rozkładzie umocnienia analizowano przez pomiar mikrotwardości w strefie złącza (do 0,5 mm od granicy złącza) na przekroju prostym do powierzchni połączenia i równoległym do kierunku propagacji frontu detonacji. Pomiary wykonano przy obciążeniu 50G. Zmiany mikrotwardości odniesiono do zmierzonej średniej wartości mikrotwardości stali, tytanu i cyrkonu przed aktem strzałowym (linia kreskowa na rys. 11).

Na rysunku 11a przedstawiono zmiany mikrotwardości w strefie połączenia w obszarze materiału podstawowego (stal). Analiza otrzymanych wyników wskazuje na znaczący wzrost twardości w stosunku do twardości stali (177 HV0,05) przed procesem zgrzewania. W przypadku płyty trimetalowej (B i C) wzrost twardości wyniósł ok. 45%, natomiast twardość stali w bimetale (A) wzrosła o 30% w stosunku do twardości blachy stalowej przed połączeniem (rys. 11c). Rozkład twardości w obszarze technologicznej międzywarstwy pozwala na stwierdzenie, że umocnienie w strefie połączenia, dla obu badanych próbek B i C, w obszarze Ti-stal (rys. 11a) i Zr-Ti (rys. 11b) jest na podobnym poziomie i wynosi średnio 230 HV0,05, co daje 25% wzrost w stosunku do twardości blachy tytanowej w stanie przed spojeniem (185 HV0,05). W przypadku materiału nastrzelianego (Zr700) odnotowano wzrost twardości dla wszystkich trzech analizowanych przypadków (rys. 11b i 11c). W przypadku układów trimetalowych twardość cyrkonu w bezpośredniej bliskości granicy połączenia jest na takim samym poziomie (ok. 230 HV0,05), jak twardość tytanu w analizowanej strefie połączenia Zr-Ti (rys. 11b). Analiza rysunku 11c wykazała, że umocnienie w materiale nakładanym układu bimetalowego (A) jest nieznacznie mniejsze niż w przypadku układów z międzywarstwą technologiczną i wynosi 220 HV0,05.

Tablica VI. Właściwości mechaniczne układów z cyrkonem o grubości 10 mm wyznaczone w próbach ścinania R_s , odrywania R_o oraz rozciągania R_m
Table VI. Mechanical properties of 10 mm zirconium cladbers determined in shearing R_s , peeling R_o and tensile R_m tests

Nr próbki	Wytrzymałość na ścinanie R_s , MPa	Miejsce ścicia próbki	Wytrzymałość na odrywanie R_o , MPa	Miejsce oderwania próbki	Wytrzymałość na rozciąganie R_m , MPa
A	393	Złącze	411	Złącze	453
B	380	Złącze (Zr-Ti)	366	Złącze (Ti-stal)	466
	476	Złącze (Ti-stal)			
C	458	Złącze (Zr-Ti)	382	Złącze (Ti-stal)	252
	471	Złącze(Ti-stal)			



Rys. 11. Zmiany mikrotwardości w strefie połączenia: a) cyrkon-tytan – trimetal B i C, b) tytan-stal – trimetal B i C, c) cyrkon-stal bimetal A. Pomiary w odległości 0.5 mm od granicy złącza. Obciążenie 50G

Fig. 11. Microhardness changes of the bonding zone: a) zirconium-titanium – trimetal B and C, b) titanium-steel – trimetal B and C, c) zirconium-steel – bimetal A. Measurement 0.5 mm from the bond boundary). Load 50G

Wnioski

W pracy poddano analizie strukturę strefy połączenia oraz właściwości bimetalu cyrkon-stal oraz trimetalu cyrkon-tytan-stal, wykonanych technologią zgrzewania wybuchowego, o wyjściowej grubości materiału nastrzelwanego (Zr700) równej 10 mm. Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- Zastosowanie międzywarstwy technologicznej z czystego tytanu w układach cyrkon-stal zgrzewanych wybuchowo umożliwia utrzymanie ciągłego połączenia podczas platerowania cyrkonem o grubości 10 mm.
- We wszystkich analizowanych przypadkach otrzymano platerę o falistej granicy połączenia i zróżnicowanych parametrach fali. Połączenie o największej amplitudzie i długości fali uzyskano w przypadku próbek trimetalowych, na granicy materiał nakładany (Zr700) – międzywarstwa technologiczna (Ti Gr.1). Parametry granicy połączenia bimetalu (Zr700-P265) oraz trimetalu (Ti Gr.1-P265) miały zbliżone wartości (długość i wysokość fali).
- Udział warstwy przetopionej w złączu (współczynnik RGP) we wszystkich analizowanych przypadkach był na akceptowalnym poziomie. Najniższą wartość zanotowano dla układu bimetalowego, natomiast największe dla trimetali, na granicy połączenia: warstwa technologiczna-materiał podstawowy.
- W analizowanych układach platerę o optymalnej charakterystyce granicy połączenia oraz odpowiednio wysokich właściwościach wytrzymałościowych otrzymano przy niskich prędkościach detonacji i małych odległościach początkowych między łączonymi blachami.
- W przypadku wszystkich wykonanych platerów zaobserwowano umocnienie zarówno w materiale nakładanym, jak i podstawowym oraz w technologicznej międzywarstwie. Umocnienie występowało w całym analizowanym obszarze (do 0,5 mm od granicy połączenia Zr-stal, oraz Zr-Ti i Ti-stal), przy czym największe wartości odnotowano bezpośrednio przy granicy.

Literatura

- [1] Blazynski T.Z., Explosive Welding, Forming and Compaction, Applied Science Publishers LTD, New York, 1983.
- [2] Prażmowski M., Paul H.: The effect of stand-off distance on the structure and properties of zirconium – carbon steel bimetal produced by explosion welding, Archives of Metallurgy and Materials, Vol. 57, Issue 4, pp. 1201+1210.
- [3] Paul H., Prażmowski M., Morgiel J., Faryna M., Skuza W.: Przemiany fazowe w strefie połączenia blach zgrzewanych wybuchowo, Rudy i metale nieżelazne R 58/2013, nr 11 s. 611+614.
- [4] PN-EN 13445-2 Nagrzewane płomieniem zbiorniki ciśnieniowe – Część 2 Materiały. PKN, 2009.
- [5] ASTM A 578/A 578M-96, Standard specification for straight-beam ultrasonic examination of plain and clad steel plates for special applications, ASTM Standard, 1996.
- [6] PN-EN 10160 Badania ultradźwiękowe wyrobów stalowych płaskich grubości równej lub większej niż 6mm (metoda echa), PKN 2010.
- [7] ASTM B 898-11, Standard specification for reactive and refractory metal clad plate. Book of ASTM Standards, vol. 02.04, 2011.
- [8] PN-ISO 6507-3 Pomiar twardości sposobem Vickersa poniżej HV 0.2 (mikrotwardość), PKN, 2000.