

Dr inż. Sylwester SAWICKI, prof. dr hab. inż. Henryk DYJA
Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Instytut Modelowania i Automatyzacji Procesów Przeróbki Plastycznej, Częstochowa
e-mail: sulsaw@wip.pcz.pl

Wytwarzanie prętów bimetalowych metodą zgrzewania wybuchowego

Production of bimetallic bars steel – steel resistant to corrosion of the method explosive cladding

Streszczenie

W artykule opisano technologię wytwarzania stalowych prętów platerowanych stalą odporną na korozję metodą zgrzewania wybuchowego. Metoda ta zapewnia otrzymanie prętów bimetalowych o bardzo wysokiej jakości oraz trwałym połączeniu poszczególnych komponentów bimetalu. Ponadto w artykule podano wyniki analizy jakości połączenia prętów bimetalowych.

Abstract

In the article the analysis of production of bimetallic bars steel-steel resistant to corrosion by explosive cladding. This method is the affirmed process the receipt the bars plated is characterizing the large strength of bond two different metals. Moreover, in this article, are presents the bond strength of interface of bimetallic joint of the cross section oh the test bar.

Słowa kluczowe: pręty bimetalowe okrągłe, stal odporna na korozję, zgrzewanie wybuchowe

Key words: *bimetallic round bars, steel resistant to corrosion, explosive cladding*

1. WPROWADZENIE

Wytwarzanie prętów bimetalowych stal - stal odporna na korozję jest procesem stosunkowo złożonym i wiąże się z wieloma problemami technologicznymi. Do najważniejszych należy uzyskanie wsadu bimetalowego o właściwej wytrzymałości złącza w obszarze połączenia rdzenia z warstwą platerującą oraz zapewnienie równomiernego płynięcia plastycznego obydwu warstw bimetalu podczas procesu walcowania. Niespełnienie tych warunków może spowodować rozwarstwienie się bimetalowego pasma podczas walcowania lub powstanie innych wad. Jedną z metod wytwarzania prętów bimetalowych jest metoda zgrzewania wybuchowego [1÷7].

1. INTRODUCTION

The production of steel – steel resistant to corrosion bimetallic bars is a relatively complex process and is associated with many technological problems. The most important of them include obtaining a bimetallic stock of proper joint strength in the region of core and cladding layer bonding, and assuring a uniform plastic flow of both bimetallic layers during the rolling process. Failure to meet the above conditions may results in a delamination of the bimetallic strip during rolling or the formation of other defects. One of the bimetallic bar manufacture methods is the method explosive cladding [1÷7].

2. MATERIAŁY UŻYTE DO BADAŃ I ICH CHARAKTERYSTYKA

Dokładność obliczeń wykonanych za pomocą programu komputerowego jest uzależniona od dokładnego określania właściwości materiałów użytych do badań. Badania plastometryczne zostały przeprowadzone na symulatorze Gleeble 3800, który znajduje się w Instytucie Modelowania i Automatykacji Procesów Przeróbki Plastycznej Politechniki Częstochowskiej, przy prędkościach odkształcenia od 0.1 s^{-1} , 1.0 s^{-1} oraz 10 s^{-1} .

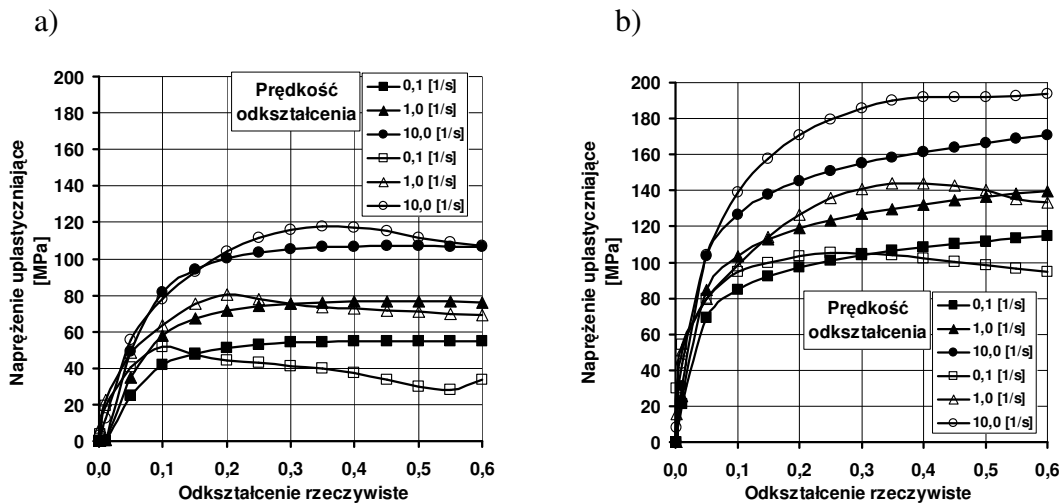
Skład chemiczny stali użytych do badań przedstawiono w tablicy 1.

2. MATERIALS USED FOR RESEARCH

The accuracy of calculations performed by means of computer program is dependent on the accurate determination of the properties of materials used for tests. Plastometric tests were performed on a Gleeble 3800 plastometer owned by the Institute of Modeling and Automation of Plastic Working Processes, Częstochowa University of Technology, using strain rates of 0.1 s^{-1} , 1.0 s^{-1} and 10 s^{-1} respectively. Chemical composition of materials used for tests is given in Table 1, whereas Fig. 1 illustrates the example testing results in the form of flow curves for steel C45E and for steel X2CrNi18-10.

Tablica 1. Skład chemiczny stali użytych do badań [%]
Table 1. Chemical composition of materials used for tests [%]

Gatunek stali Grade of steel	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn
C45E	0,45	0,64	0,21	0,015	0,031	0,13	0,14	0,04	0,25	0,015
X2CrNi18-10	0,03	2,00	0,24	0,045	0,03	19,0	10,0	0,75	-	-



Rys. 1. Krzywe płynięcia dla stali C45E (a) i dla stali X2CrNi18-10 (b), dla temperatury $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Oznaczenia: $\circ \Delta \square$ – znaczniki badań plastometrycznych, $\bullet \blacktriangle \blacksquare$ – znaczniki wyników aproksymacji badań plastometrycznych

Fig. 1. The flow curves for: steel C45E (a) and for steel X2CrNi18-10 (b), for a temperature of $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Sings: $\circ \Delta \square$ – plastometric tests, $\bullet \blacktriangle \blacksquare$ – approximated based on experimental plastometric tests
(The curves denoted with filled signs represent experimental results, the remaining curves are approximated based on experimental tests)

Na rys. 1 przedstawiono przykładowe krzywe płynięcia w temperaturze 1100 °C dla stali C45E (rys. 1a) oraz stali X2CrNi18-10 (rys. 1b). Krzywe płynięcia oznaczone na rysunku 1 znacznikami niewypełnionymi (○△□) odpowiadają wynikom badań plastometrycznych, krzywe oznaczone znacznikami wypełnionymi (●▲■) odpowiadają wynikom aproksymacji badań plastometrycznych.

Analizując dane przedstawione na rys. 1 można stwierdzić, że wartości naprężenia uplastyczniającego dla stali X2CrNi18-10 są znacznie większe niż dla stali C45E. Różnica ta ma znaczny wpływ na proces walcowania prętów bimetalowych w wykrojach. Wyższe wartości naprężenia uplastyczniającego w warstwie platerującej mogą wpłynąć na plastyczne płynięcie poszczególnych komponentów pręta bimetalowego w wykrojach [3, 6].

3. ZGRZEWANIE WYBUCHOWE WSA- DU BIMETALOWEGO

Do zgrzewania wybuchowego prętów przygotowano zestawy robocze składające się z rur ze stali odpornej na korozję X2CrNi18-10 oraz prętów ze stali C45E. Zestaw roboczy do zgrzewania wybuchowego pokazano na rys. 2. Natomiast na rys. 3 pokazano gotowe pręty bimetalowe otrzymane po zgrzewaniu wybuchowym.

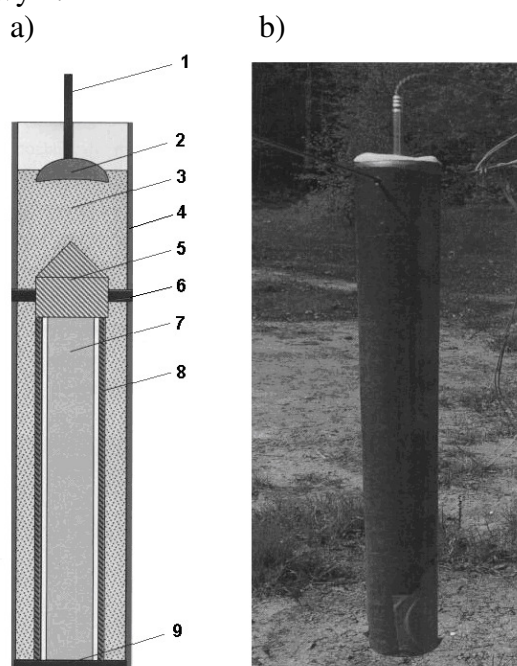


Figure 1 shows an example flow curves at 1100 °C for C45E steel (Fig. 1a) and steel X2CrNi18-10 (Fig. 1b). Flow curves in Figure 1 that are marked with - ○△□ match results of the study plastometric, curves that are marked with - ●▲■ match the results of approximation plastometric research.

When analyzing the data in Figure 1 it can be found that the yield stress values for the X2CrNi18-10 steel are much higher than for the C45E steel. This difference has a considerable influence on the process of rolling bimetallic bars in passes. The higher yield stress values in the clad layer reduce the effect of the clad layer "flowing down" from the bimetallic bar core [3, 6].

3. EXPLOSIVE WELDING OF BIMETAL- LLIC STOCK

For explosive welding of bars, sets composed of X2CrNi18-10 corrosion-resisting steel pipes and C45E steel bars were prepared. The system and its individual components are illustrated in Fig. 2. Whereas, Figure 3 shows finished bimetallic bars obtained after explosive welding.

Rys. 2. Zestaw roboczy stosowany do zgrzewania wybuchowego bimetalowego wsadu: a) schemat, b) widok. Oznaczenia: 1 – zapalnik, 2 – detonator, 3 – sypki materiał wybuchowy, 4 – rura PCV, 5 – korek centrujący, 6 - element centrujący, 7 – pręt stalowy, 8 – rura ze stali odpornej na korozję, 9 – dolny krążek centrujący

Fig. 2. Schematic (a) and actual view (b) of systems used for explosive welding of bimetallic stock: 1 – detonator, 2 – primary explosive, 3 – loose explosive, 4 – PCV tube, 5 – centring plug, 6 – element aligning, 7 – steel bar, 8 – corrosion-resisting steel pipe, 9 – bottom centring disk



Rys. 3. Pręty bimetalowe po zgrzewaniu wybuchowym
Fig. 3. Bimetallic bars after explosive welding

Na podstawie badań prętów bimetalowych po zgrzewaniu wybuchowym stwierdzono, że zmieniając początkowe wymiary rur i prętów oraz wstępne odległości pomiędzy nimi można uzyskać pręty bimetalowe o żądanej średnicy zewnętrznej oraz wymaganej grubości warstwy platerującej [1, 2].

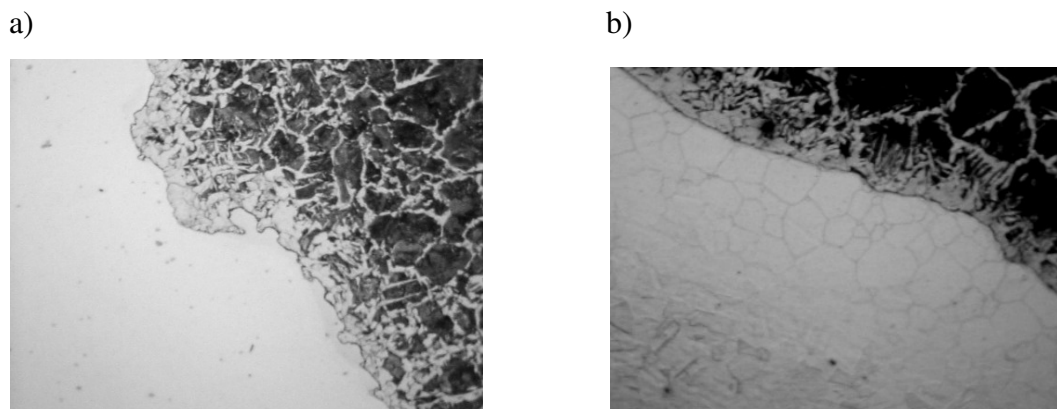
4. MIKROSTRUKTURA STREFY ZŁĄCZA PRĘTÓW BIMETALOWYCH PO ZGRZEWANIU WYBUCHOWYM

Z bimetalowych prętów po zgrzewaniu wybuchowym pobrano próbki do badań mikrostrukturalnych. Analizę zmian mikrostruktury przeprowadzono zarówno dla rdzenia jak i dla warstwy platerującej pręta. Na rys. 4a i 4b przedstawiono mikrostrukturę obszarów złącza w badanych prętach. Stwierdzono, że po zgrzewaniu wybuchowym rdzeń charakteryzował się strukturą ferrytyczno-perlityczną (z przewagą perlitu - około 80%) o wielkości ziarna ferrytu w klasie wzorca 9,0 i ziarna perlitu $8,0 \div 8,5$ (wg wzorca EN-ISO 643:2003). W strefie połączenia ziarna perlitu w przecie były w klasie wzorca 8,0; a ziarna ferrytu w klasie wzorca 9,0. Warstwa platerująca wykazywała strukturę austenityczną z ziarnem o wielkości klasy wzorca 9,0. Stwierdzono, że obszar połączenia rdzenia i warstwy platerującej był falisty, bez tlenków oraz postrzępień. W strefie tej nie stwierdzono obecności jakichkolwiek zanieczyszczeń.

Based on the testing of bimetallic bars after explosive welding it has been found that by changing the initial dimensions of pipes and bars and the initial distances between them, bimetallic bars of the desired inner diameter and the required cladding layer thickness can be obtained [1, 2].

4. MICROSTRUCTURE OF THE JOINT ZONE IN BIMETALLIC BARS AFTER EXPLOSIVE WELDING

Samples for microstructural examinations were taken from bimetallic bars obtained after explosive welding. The analysis of changes in the microstructure was performed both for the core and for the clad layer of the bar. Figure 4a and 4b show the microstructure of the joint regions in the bars examined. It was found that the core after explosive welding exhibited a ferritic-pearlitic structure (with a majority of pearlite of approx. 80%) with the ferrite grain size in the standard class of 9.0, and the pearlite grain size of $8.0 \div 8.5$ (acc. to the EN-ISO 643:2003 standard). In the joint zone, pearlite grains in the bar were in the standard class of 8.0, whereas the ferrite grains in the standard class of 9. The clad layer, in turn, had an austenitic structure with the grain size in the standard class of 9.0. It was found that the area of the core-clad layer joint was wavy, with no oxides or fraying. No presence of any impurities was found in this zone.



Rys. 4. Mikrostruktura w obszarze połączenia pręta bimetalowego po zgrzewaniu wybuchowym: a) rdzenia, pow. 100x, trawionego nitaliem; b) warstwy platerującej, pow. 100x, trawionej 45ml H₂O, 30ml HNO₃, 15ml HCl, 10ml HF

Fig. 4. The microstructure in the joint region of a bimetallic bar after explosive welding: a) the core, , zoom 100x, etched with Nital; b) clad layer, zoom 100x, etched with 45ml H₂O, 30ml HNO₃, 15ml HCl, 10ml HF

Z analizy wyników badań wynika, że różne pręty po zgrzewaniu wybuchowym charakteryzowały się porównywalną strukturą warstwy platerującej i rdzenia w obszarze złącza. Nie zaobserwowano różnic w wielkości ziarna ferrytu oraz ziarna perlitu. W obydwu przypadkach stwierdzono występowanie falistego obszaru złącza.

The analysis of the testing results shows that different bars after explosive welding exhibited comparable cladding layer and core structures in the joint region. No differences in grain sizes between ferrite and pearlite were observed. A wavy joint area was found to occur in both cases.

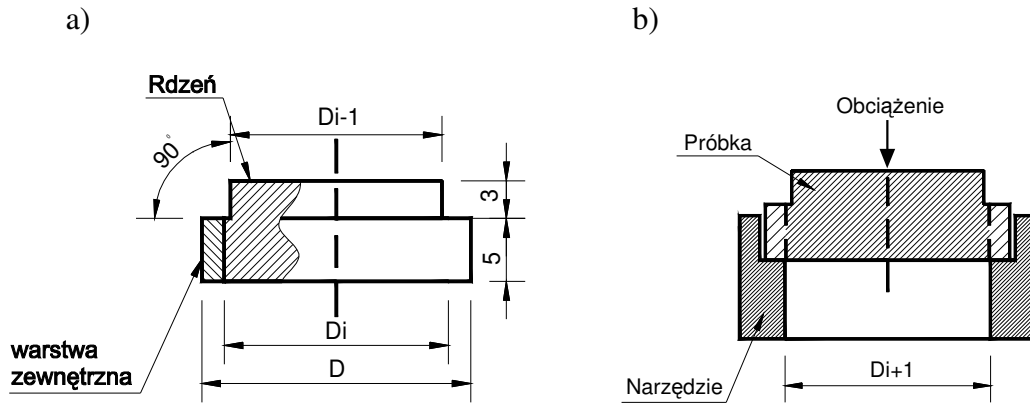
5. JAKOŚĆ POŁĄCZENIA PRĘTÓW BIMETALOWYCH

Do oceny jakości połączenia prętów bimetalowych wykorzystano metodę maksymalnego naprężenia ścinającego na granicy złącza. Na rysunku 5a pokazano kształt i wymiary próbek, natomiast na rysunku 5b pokazano kształt i wymiary matryc użytych do tych badań.

Wyniki badań jakości połączenia warstw stal – stal odporna na korozję (maksymalne naprężenia ścinające) po zgrzewaniu wybuchowym przedstawiono na rysunku 6. Z danych zamieszczonych na rysunku 6 wynika, że różnica pomiędzy najmniejszą wartością naprężenia ścinającego (próbka nr 2; 140 MPa), a największą (próbka nr 3; 230 MPa), nie przekroczyła 40%. Dla wszystkich badanych próbek jakość połączenia była na tyle dobra, że nie nastąpiło rozerwanie poszczególnych warstw, a jedynie wyciśnięcie pręta bimetalowego przez oczko matrycy testującej.

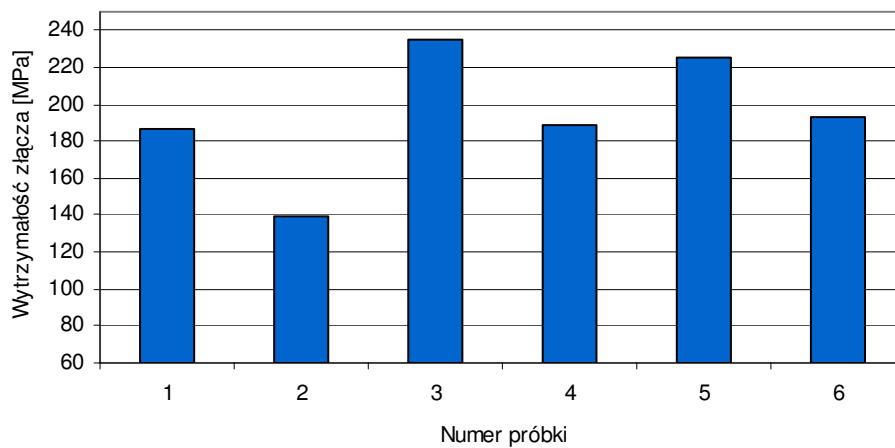
5. THE QUALITY OF THE BIMETALLIC BAR BOND JOINT

For the quality assessment of bimetallic bars, a method relying on the maximum shearing stress at the joint boundary was used. In Figure 5a shows the shape and dimensions of samples, while Figure 5b shows the shape and dimensions of the matrices used for quality testing. The results of the quality examination of the steel – corrosion-resisting steel joint (maximal shearing stress) after explosive welding are represented in Figure 5. The data in Figure 6 show that the difference between the lowest (test piece no. 2; 140 MPa) and the highest (test piece no. 3; 230 MPa) stress values does not exceed 40%. For all of the test pieces examined, the quality of the joint was good enough so that no breaking of individual layers occurred, but only squeezing out of the bimetallic bar through the test die.



Rys. 5. Wymiary próbek (a) i matryc (b) do badania jakości złącza prętów bimetalowych połączeniu metodą zgrzewania wybuchowego

Fig. 5. Dimensions of test specimens (a) and testing dies (b) used for quality testing of the bimetal bar joint after explosive cladding



Rys. 6. Wytrzymałość na ścinanie próbek bimetalowych po zgrzewaniu wybuchowym

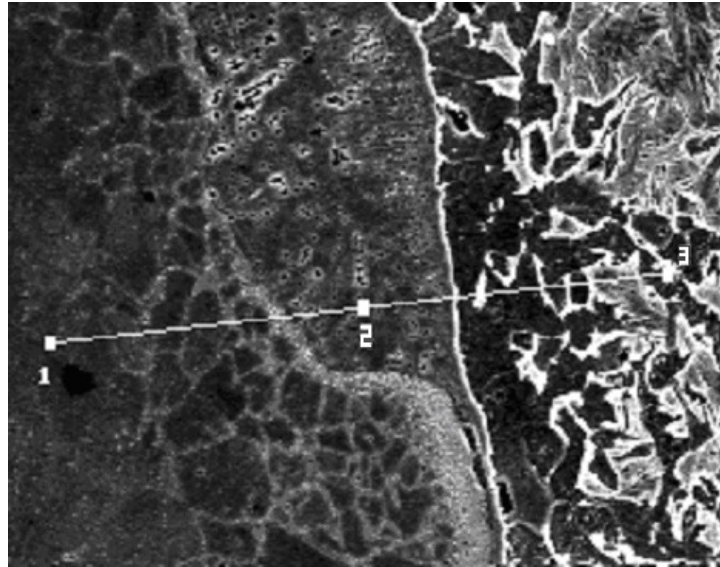
Fig. 6. The shear strength of bimetallic test pieces after explosive welding

W celu dokładniejszej analizy jakościowej połączenia pomiędzy warstwami bimetalu przeprowadzono mikroanalizę obszaru złącza metodą EDX.

Wyniki tych badań przedstawiono na rysunkach 7, 8 oraz w tabelicy 2. Na podstawie wyników przeprowadzonej mikroanalizy metodą EDX próbki bimetalowej po zgrzewaniu wybuchowym można stwierdzić, że lokalnie - przy granicy połączenia, powstała warstewka przejściowa o szerokości około $35\ \mu\text{m}$ - obszar 2, która jest mieszaniną głównie niklu, chromu i żelaza, o zawartości 10%Cr, 5%Ni i 83%Fe, gdy dla obszaru 1 - rdzeń próbki bimetalowej, zawartość tych pierwiastków wynosiła 0%Cr, 0%Ni i 99%Fe, natomiast w obszarze 3 - warstwa platerująca, 19%Cr, 10%Ni i 69%Fe.

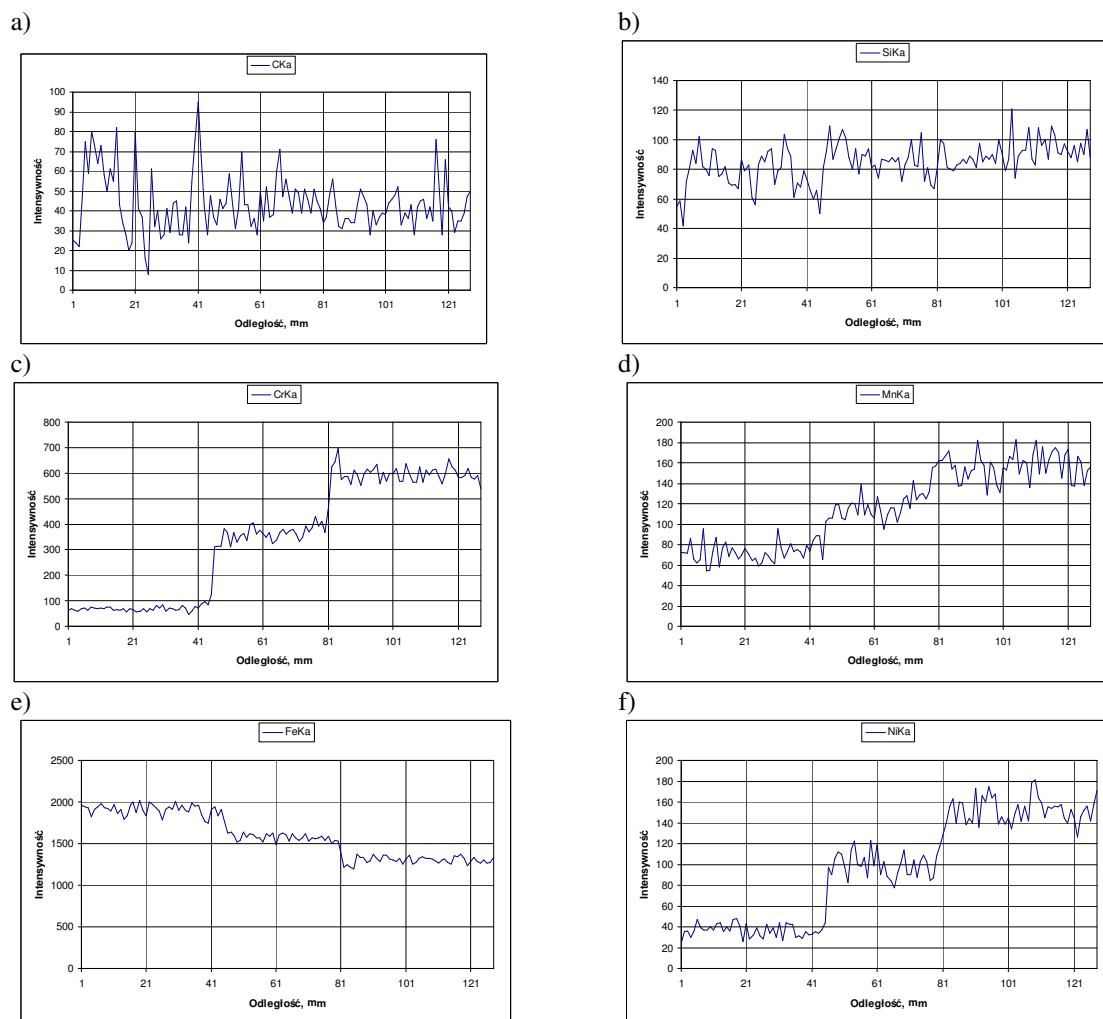
To examine the quality of the joint between bimetallic layers more precisely, microanalysis of the joint region was made by the EDX method.

The results of this microanalysis are given in Figures 7, 8 and in Table 2. From the results of the EDX analysis of a bimetallic sample after explosive welding it can be found that locally, at the joint boundary, a $35\ \mu\text{m}$ wide transitory film has formed - region 2, which consist of a mixture of mainly nickel, chromium and iron, with the following contents: 10%Cr, 5%Ni and 83%Fe. For region 1 - the core of the bimetallic sample, the contents of these elements are as follows: 0%Cr, 0%Ni and 99% Fe; whereas, in region 3 - the clad layer, these are: 19%Cr, 10%Ni and 69%Fe.



Rys. 7. Mikrostruktura obszaru połączenia pręta bimetalowego po zgrzewaniu wybuchowym, pow. 320x - analiza EDX.
Oznaczenia: 1 – obszar rdzenia próbki, 2 – obszar granicy połączenia, 3 – obszar warstwy platerującej

Fig. 7. The microstructure of the joint region of bimetallic bar after explosive welding, zoom 320x - EDX analysis.
Region 1 – the core of the bimetallic sample, 2 – region in the joint boundary, 3 – the clad layer



Rys. 8. Liniowy rozkład wybranych pierwiastków w obszarze granicy połączenia pręta pokazanym na rysunku 7;
a) węgiel, b) siarka, c) chrom, d) mangan, e) żelazo, f) nikiel

Fig. 8. Linear distribution of selected elements in the bonding interface shown in Figure 7; a) carbon, b) sulfur, c) chromium, d) manganese, e) iron, f) nickel

Tablica 2. Udział procentowy pierwiastków w obszarach granicy połączenia pręta z rysunku 7
(% wagowy / % atomowy)

Table 2. Percentage fractions of elements in particular regions of the joint from Figure 7 (wt% / at%)

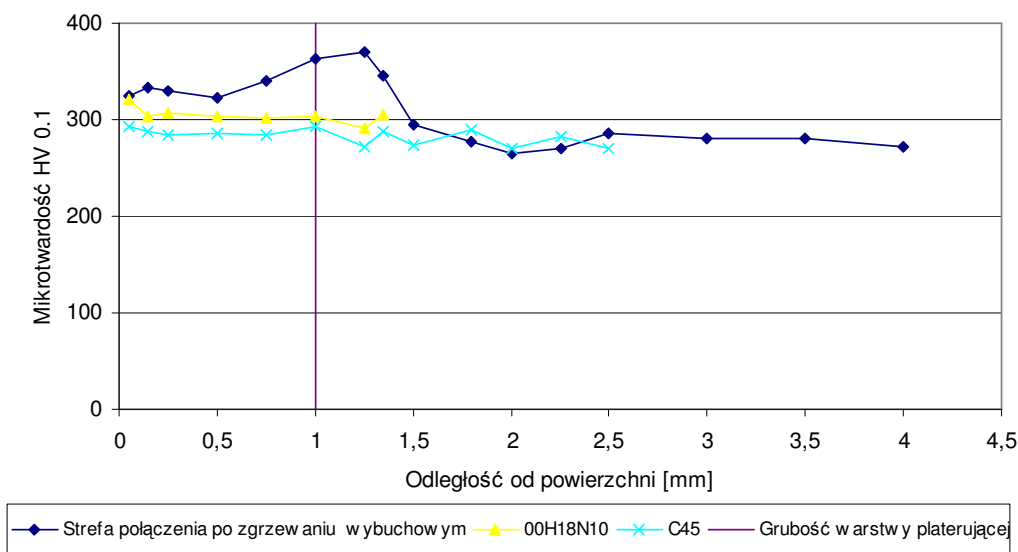
Oznaczenie miejsca analizy Area	Si	Mn	Fe	Cr	Ni
Obszar 1/Area 1	0,27 / 0,53	0,66 / 0,67	99,07 / 98,80	---	---
Obszar 2/Area 2	0,48 / 0,95	1,17 / 1,18	83,08 / 82,27	10,00 / 10,64	5,27 / 4,96
Obszar 3/Area 3	0,58 / 1,14	1,73 / 1,74	68,68 / 67,66	18,85 / 19,95	10,15 / 9,51

Badania mikrotwardości warstw w obszarze granicy połączenia przeprowadzono dla próbki otrzymanej po zgrzewaniu wybuchowym, w której grubość warstwy platerującej wynosiła 1,0 mm. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunku 9.

Porównując uzyskane wartości mikrotwardości materiałów wyjściowych oraz prętów bimetalowych po zgrzewaniu wybuchowym można stwierdzić, że nastąpił wzrost mikrotwardości badanych materiałów. Wzrost ten spowodowany był umocnieniem materiału podczas zgrzewania wybuchowego i odkształcenia warstwy platerującej. Duży wzrost mikrotwardości zaobserwowano w strefie granicy połączenia. Największy wzrost mikrotwardości w strefie granicy połączenia (25% do 30%) uzyskano dla próbki bimetalowej, o grubości warstwy platerującej ok. 1,0 mm (rys. 9).

Microhardness tests of layers in respective joint regions were carried out for 3 selected samples obtained after explosive welding. The results of these tests are represented in Figure 9. The hardness tests were performed by the Vickers method according to the PN-ISO 6507-3 standard.

When comparing the obtained microhardness values for the initial materials and the bimetallic bars after explosive welding it can be found that an increase in the microhardness of the materials examined has occurred. This microhardness increase was caused by hardening of the material during explosive welding and the deformation of the clad layer. A high increase in microhardness was observed in the joint zone. The highest microhardness increase in the joint zone (25% to 30%) was obtained for a bimetallic sample, which had a clad layer thickness of 1.0 mm (Fig. 9).



Rys. 9. Rozkład mikrotwardości dla materiałów wsadowych oraz w prętach bimetalowych po łączeniu wybuchowym - grubość warstwy platerującej – 1,0 mm

Fig. 9. The distribution of microhardness for stock materials and in bimetallic bars after explosive welding - with a clad layer thickness of – 1,0 mm

Przyrost mikrotwardości dla stali C45E po zgrzewaniu wybuchowym wynosił średnio około 5%. Przyrost mikrotwardości warstwy platerującej po zgrzewaniu wybuchowym wynosił średnio około 10%. Wartości mikrotwardości dla materiałów jednorodnych wynosiły odpowiednio dla stali C45E - średnio 282 HV_{0,1}, natomiast dla stali odpornej na korozję - średnio 305 HV_{0,1}.

6. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że poprzez właściwe dobranie, dla badanych metali, parametrów zgrzewania wybuchowego uzyskano bimetalowy półwyrob charakteryzujący się trwałym połączeniem warstw bimetalu o regularnych falach z warstwą przejściową w strefie połączenia, spełniająca warunki materiału wyjściowego do walcowania na gorąco. O dobrej jakości połączenia warstw bimetalowych świadczy istnienie warstwy przejściowej pomiędzy łączonymi warstwami bimetalowego wsadu.

The microhardness increment for steel C45E explosively welded averaged out at about 5%. The increment in the microhardness of the clad layer after explosive welding was approx. 10% on the average. Microhardness values for homogeneous materials were, respectively: for steel C45E, an average of 282 HV0.1; while for the corrosion-resisting steel, 305 HV0.1 on the average.

8. CONCLUSIONS

On the basis of the performed tests it was found that by the proper selection of explosive welding parameters for the metals tested, a bimetallic semi-finished product was obtained, which was characterized by a fast joint between bimetallic layers with regular waves, meeting the conditions imposed on feedstock to be hot rolled. The good quality of the joint between the bimetallic layers is indicated by the existence of a transitory layer between the bimetallic feedstock layers joined.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Babul W., Ziemia S.: Materiały wybuchowe w technologicznych procesach obróbki tworzyw. PWN, Warszawa 1972.
- [2] Dyja H., Maranda A., Trębiński R.: Zastosowanie technologii wybuchowych w inżynierii materiałowej, Politechnika Częstochowska, Prace Naukowe, WMiIM, Seria Metalurgia Nr 20, Częstochowa 2001.
- [3] Dyja H., Mróz S., Rydz D.: Technologia i modelowanie procesów walcowania wyrobów bimetalowych. Wydawnictwo WIPMiFS 2003, Seria Metalurgia Nr 33.
- [4] Mróz S.: Teoretyczno-doświadczalna analiza procesu walcowania bimetalowych prętów, Praca doktorska, Politechnika Częstochowska 2002.
- [5] Mróz S., Dyja H., Maranda A., Nowaczewski J., Madej W.: Wytwarzanie bimetalowych prętów stal-miedź metodą wybuchową. Hutnik 2001 Nr 7-8 s. 271-276.
- [6] Sawicki S.: Teoretyczne i doświadczalne aspekty walcowania prętów żebrowanych platerowanych stalą odporną na korozję, Praca doktorska, Politechnika Częstochowska 2009.
- [7] Sawicki S., Mróz S.: Analiza metod wytwarzania prętów bimetalowych stal – stal odporna na korozję, VII Międzynarodowa Konferencja Naukowa, Nowe Technologie i Osiągnięcia w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej. Częstochowa 2006. Materiały Konferencyjne Wydziału Inżynierii Procesowej Materiałowej i Fizyki Stosowanej. Seria Metalurgia nr 48 s. 495-499, ISBN 83-7193-300-2.