This article is available in PDF-format, in colour, at: www.wydawnictwa.ipo.waw.pl/materialy-wysokoenergetyczne.html

Materiały Wysokoenergetyczne / High-Energetic Materials, ***2016****, 8, 91 − 102*
ISSN 2083-0165
Copyright © 2016 Institute of Industrial Organic Chemistry, Poland

Badania nad zastosowaniem zgrzewania wybuchowego do uzyskania bimetalicznych blach z udziałem staliwa Hadfielda*

*Research into the application of explosive welding of metal sheets with Hadfield's steel (Mangalloy)**

Robert Kosturek, Andrzej Maranda, Cezary Senderowski, Dariusz Zasada

Wojskowa Akademia Techniczna, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, PL

Streszczenie: *Celem pracy było otrzymanie zgrzewanych wybuchowo blach stalowych 22G2A i 15HM z odpornym na ścieranie staliwem Hadfielda za pomocą amonowo-saletrzanych materiałów wybuchowych. Analizowano właściwości strukturalne oraz stopień umocnienia utworzonego złącza, określając jednocześnie odporność na zużycie erozyjne staliwa Hadfielda w stanie po zgrzaniu wybuchowym, w porównaniu do stali 65G stosowanej na elementy koła bijakowego w kotłach pyłowych.*
Abstract: *The purpose of this work was to weld steel sheets with sheets made of Hadfield steel (mangalloy) using industrial explosives. The degree of strengthening of the Hadfield steel layer and the structure of the bond between the welded steels, was examined. The results of erosive wear testing between steel 65G (used in hammer mills) and welded Hadfield steel has been compared.*

Słowa kluczowe: *zgrzewanie wybuchowe, prędkość detonacji, staliwo Hadfielda*
Keywords: *explosive welding, detonation velocity, Hadfield cast-steel*

1. Wstęp

Miarą rozwoju cywilizacji są opanowane przez nią technologie otrzymywania i modyfikowania materiałów. Zgrzewanie, jako metoda łączenia metali było znane już w czasach starożytnych. Technologia ta rozpowszechniona była we wszystkich wielkich cywilizacjach antycznego świata – Grecji, Rzymie, Egipcie czy Chinach. Setki lat przekuwania metali na kowadle odeszły z wiatrem historii, zmiecione dymami rewolucji przemysłowej. Względnie nową i niekonwencjonalną technologią zgrzewania metali jest tzw. zgrzewanie wybuchowe, wykorzystujące energię detonacji materiału wybuchowego [1-19]. Pozwala ona łączyć praktycznie wszystkie metale, a uzyskiwane połączenia oznaczają się bardzo korzystnymi właściwościami. Produkty tego procesu znajdują zastosowanie w każdej gałęzi przemysłu, m.in. w energetyce.
W Polsce blisko 90% energii elektrycznej jest produkowane w elektrowniach węglowych, wykorzystujących węgiel kamienny oraz brunatny. Podczas spalania węgla mieszanina pyłu węglowego oraz powietrza oddziałuje na niektóre z elementów instalacji kotłów pyłowych, powodując ich znaczące zużycie erozyjne. Przekłada się to w sposób negatywny na pracę całej elektrociepłowni – wymagane są m.in. częste naprawy i wymiana zużytych elementów (kół bijakowych młyna wentylatorowego). Problem ten można rozwiązać przez wykonanie elementów kół bijakowych z materiałów o większej odporności na zużycie erozyjne panujące w warunkach pracy młyna wentylatorowego. Takimi materiałami mogą być blachy stalowe zgrzewane wybuchowo z wyjątkowo odpornym na zużycie ścierne staliwem Hadfielda – szczególnie w warunkach jego silnego umocnienia w procesie

* Praca została zaprezentowana na International Conference Blasting Techniques 2016, Stara Lesna 19-20.05.2016. / This paper was presented at the International Conference "Blasting Techniques 2016" May 19-20, 2016, Stara Lesna, Slovakia.

zgrzewania wybuchowego. Użyta stal konstrukcyjna w wytworzonych wybuchowo złączach hybrydowych kół bijakowych, stanowi element niezbędny do uzyskania połączenia spawanego w układzie młyna wentylatorowego – przy praktycznie niespawalnym staliwie Hadfielda.
Celem pracy było otrzymanie hybrydowych układów blach stalowych zgrzewanych wybuchowo, w których staliwo Hadfielda jest materiałem nakładanym. W analizie uzyskanych wyników zmierzono też prędkość detonacji MW zastosowanych w procesie zgrzewania wybuchowego oraz określono właściwości strukturalne wytworzonych złącz i stopień umocnienia staliwa Hadfielda, wraz z jego odpornością na zużycie erozyjne z udziałem luźnego ścierniwa – analizowane w badaniach porównawczych ze stalą 65G stosowaną powszechnie na elementy koła bijakowego w kotłach pyłowych.

2. Część eksperymentalna

2.1. Materiały wykorzystane w badaniach

W ramach przeprowadzonych prac eksperymentalnych stosowano stale i składniki materiałów wybuchowych, których charakterystyki przedstawiono poniżej:

– płytki ze staliwa Hadfielda X120Mn12 [20] o wymiarach 100x80x3 mm,

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]
1,1÷1,3	12,0÷13,0	0,3÷0,5	do 0,100	do 0,040	do 1,5

– płytki ze stali kotłowej 15HM o wymiarach 90x72x5 mm,

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cu [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]
0,11÷0,18	0,4÷0,7	0,15÷0,35	do 0,04	do 0,04	do 0,25	0,7÷1	do 0,35	0,4÷0,55

– płytki ze stali konstrukcyjnej o podwyższonej wytrzymałości 22G2A o wymiarach 90x72x5 mm,

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]
0,18÷0,26	1,3÷1,6	0,17÷0,37	do 0,035	do 0,035	do 0,25	do 0,25	do 0,2

– płytki ze stali sprężynowej 65G o wymiarach 30x25x4 mm,

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]
0,6÷0,7	0,9÷1,2	0,15÷0,4	do 0,04	do 0,04	do 0,3	do 0,3	do 0,25

– zmielona saletra amonowa granulowana o wysokiej porowatości do produkcji saletroli firmy YARA,
– pył aluminiowy płatkowany o zawartości Al ok. 93% i rozmiarach cząstek 100 μm,
– matryca firmy AUSTIN POWDER, Hydrox U, o lepkości 120000 cP i gęstości 1,42 g/cm^3 [21, 22],

Azotan(V) amonu [%]	Azotan(V) sodu [%]	Faza organiczna [%]	Woda [%]
64,4	4,6	6	15

– mikrobalony (MB) firmy AKZO NOBEL, Expancel DE, 461 DET 40 d25, wymiar cząstek (35 ÷ 55) μm, gęstość nasypowa 25 ± 3 kg/m^3.

2.2. Układ do zgrzewania wybuchowego

Wykorzystany w badaniach układ składał się z płyty podstawowej jako stali, odpowiednio 15HM lub 22G2A – o wymiarach 90x72 mm i 5 mm grubości. Płytą nastrzeliwaną było staliwo Hadfielda X120Mn12 o wymiarach 100x80 mm i 3 mm grubości. Wymiary płyty nastrzeliwanej były większe w celu ograniczenia tzw. efektu brzegowego, czyli niższego ciśnienia produktów detonacji na brzegach warstwy materiału wybuchowego. Płyty stalowe zostały wcześniej oszlifowane na powierzchni łączenia i odtłuszczone acetonem. Na rogach płyty podstawowej znajdowały się dystanse w postaci krótkich odcinków izolowanych kabli o grubości 3 mm, co odpowiadało grubości napędzanej płyty. Na płycie napędzanej umieszczono kartonowy pojemnik, na którego

Copyright © 2016 Institute of Industrial Organic Chemistry, Poland

podstawę składał się prostokąt o wymiarach 100x80 mm (wymiary płyty napędzanej) oraz trójkąt o wysokości 50 mm i podstawie 80 mm.
Wysokość pudełka wyznaczała jednocześnie grubość warstwy materiału wybuchowego, która wynosiła 30 mm, czyli dziesięciokrotność grubości napędzanej płyty. Trójkątna część służyła jako miejsce na ulokowanie zapalnika, a materiał wybuchowy w niej zawarty zapewniał ustabilizowanie prędkości fali detonacyjnej po inicjacji (w przeciwnym wypadku fala detonacyjna wygenerowana przez zapalnik mogłaby zawyżyć wyniki pomiarów). Prędkość detonacji mierzono metodą czujników zwarciowych. W skonstruowanym układzie prostokątnego pudełka przechodziły cztery czujniki zwarciowe, między którymi odstępy wynosiły 20 mm. Z każdego strzału otrzymano trzy pomiary czasu, jednocześnie uzyskując zgrzewaną próbkę.

2.3. Stosowane materiały wybuchowe

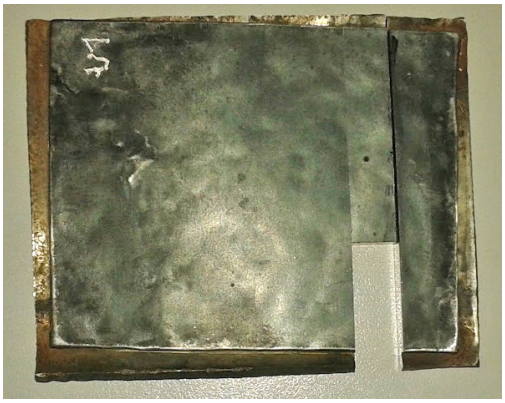
Do przeprowadzenia procesu zgrzewania wybuchowego sporządzono trzy amonale o różnej zawartości pyłu aluminiowego: 3%, 5% i 7% oraz materiał wybuchowy emulsyjny o zawartości 0,6% mikrobalonów. Amonale przygotowano z saletry amonowej i pyłu aluminiowego, scharakteryzowanych w punkcie 2.1. Materiał wybuchowy emulsyjny sporządzono na drodze uczulenia matrycy firmy AUSTIN POWDER mikrobalonami. Pobudzenie było realizowane za pomocą elektrycznego zapalnika górniczego. Wyniki prędkości detonacji oraz otrzymanych połączeń zamieszczono w tabeli 1.

Tab. 1. Prędkości detonacji stosowanych MW oraz wyniki prób połączenia

MW	Gęstość [g/cm^3]	Prędkość detonacji [km/s]	Łączone materiały [nakładany/podstawa]	Wynik połączenia	Oznaczenie próbki
Amonal 3% Al	0,97	2,28 ± 0,03	X120Mn12/15HM	Pozytywny	A3
Amonal 5% Al	0,98	2,40 ± 0,06	X120Mn12/15HM	Pozytywny	A5
Amonal 7% Al	0,92	2,26 ± 0,08	X120Mn12/15HM	Pozytywny	A7
MWE 0,6% MB	1,11	5,35 ± 0,08	X120Mn12/22G2A	Negatywny	-

W rezultacie otrzymano 3 próbki: A3 (rys. 1), A5 (rys. 2) oraz A7 (rys. 3). Zgrzewanie wybuchowe materiałem emulsyjnym zakończyło się niepowodzeniem, co należy tłumaczyć jego zbyt wysoką prędkością detonacji (rys. 4). Wszystkie badane materiały zdetonowały od zapalnika ERG w warstwie 30 mm. Ponieważ zastosowany układ do zgrzewania wybuchowego był układem równoległym to otrzymane prędkości detonacji przyjmujemy za równe prędkości łączenia płyt.

Rys. 1. Próbka A3 po wycięciu fragmentów na zgłady metalograficzne i do badań erozyjnych



Rys. 2. Próbka A5 z wyciętym fragmentem do badań metalograficznych

Copyright © 2016 Institute of Industrial Organic Chemistry, Poland

Rys. 3. Próbka A7 z wyciętym fragmentem do badań metalograficznych

Rys. 4. Nieudane połączenie przy użyciu materiału emulsyjnego. Po lewej stronie płytka ze stali 22G2A, a po prawej ze staliwa Hadfielda. Zdjęcie wykonane od strony powierzchni łączonych. Widoczne nadtopienia metalu oraz ścięte krawędzie płytki napędzanej

2.4. Przygotowywanie zgładów metalograficznych

Z otrzymanych próbek wycięto mniejsze elementy za pomocą przecinarki Struers Labatom-3, które następnie zainkludowano w żywicy termoutwardzanej na prasie elektrohydraulicznej StruersLaboPress. Kolejnym krokiem było oszlifowanie i wypolerowanie próbek na szlifierko-polerce Minitech 265. W ten sposób przygotowano próbki nietrawione. Próbki trawione otrzymano oddziałując odczynnikiem Kallingsa (50 ml CH_3OH + 50 ml HCl + 50 g $CuCl_2$).

2.5. Badanie umocnienia staliwa Hadfielda

Badania twardości staliwa Hadfielda wykonano przed procesem detonacji wybuchowej na twardościomierzu Rockwella, a ich rezultaty zestawiono z wynikami otrzymanych próbek. Średnie z 5 wyników pomiarów w skali HRC zostały przedstawiono w skali twardości Vickersa [HV] (tabela 2).

Copyright © 2016 Institute of Industrial Organic Chemistry, Poland

Tab. 2. Twardość [HV] staliwa Hadfielda przed umocnieniem oraz w stanie po zgrzewaniu wybuchowym

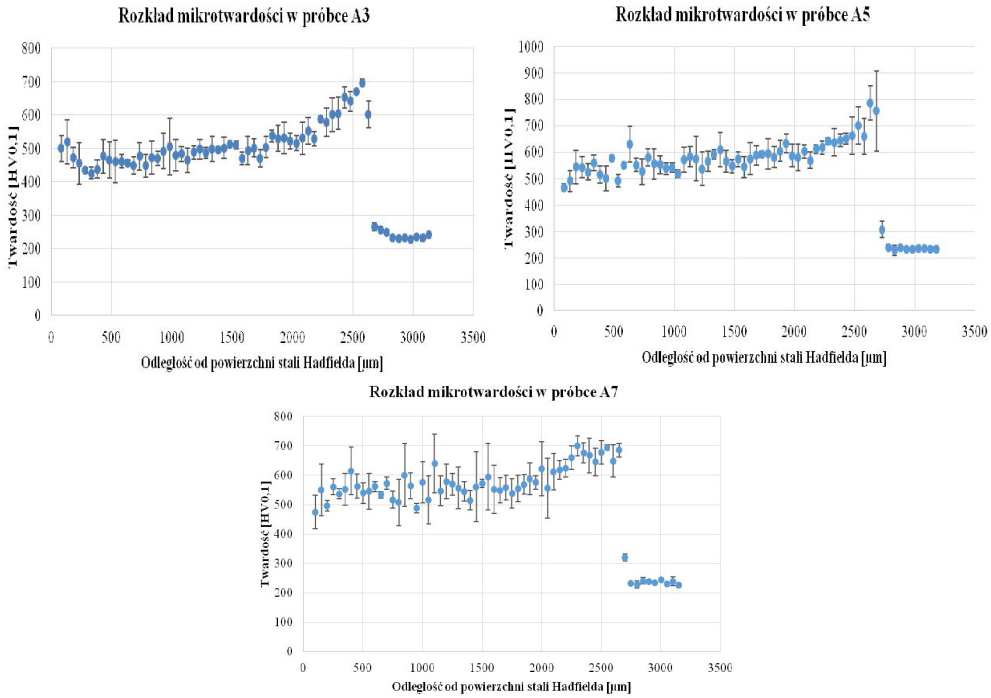
Próbka	X120Mn12	A3	A5	A7
Twardość [HV]	229,92 ± 19,22	330,38 ± 17,84	346,34 ± 9,35	348,24 ± 26,19

Analiza uzyskanych wyników twardości wykazuje wyraźne umocnienie warstwy wierzchniej staliwa Hadfielda poddanego oddziaływaniu materiału wybuchowego, jakkolwiek stosunkowo duże odchylenie standardowe uzyskanych wyników HV, nie pozwala jednoznacznie określić, który z użytych amonali najbardziej umocnił powierzchnię.

Do badania rozkładu mikrotwardości w próbkach zastosowano metodę Vickersa z użyciem mikrotwardościomierza Shimadzu M, przy zastosowanym obciążeniu 100 g (HV 0.1) w czasie 5 s. Ścieżki pomiarowe prowadzono na przekroju poprzecznym wytworzonego złącza, od warstwy wierzchniej (WW) staliwa Hadfielda do płyty podstawowej. Dla każdej próbki wykonano 3 takie ścieżki. Odległość między odciskami w WW staliwa Hadfielda wynosiła ok. 70 µm (50 µm w poziomie oraz 50 µm w pionie) i ok. 141 µm w WW stali 15HM. W ten sposób wykluczono oddziaływanie sąsiadujących odcisków na siebie. Przekątne otrzymanych odcisków wgłębnika zmierzono z użyciem programu NIS-Elements Br 3.2. stanowiącego wyposażenie mikroskopu optycznego Nikon MA 200. Twardość w skali HV obliczono ze wzoru (1), a uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 5.

$$HV = 1854{,}4 \cdot \frac{P}{d^2} \tag{1}$$

gdzie: P – przyłożone obciążenie [N], d – średnia długość przekątnej odcisku [µm].



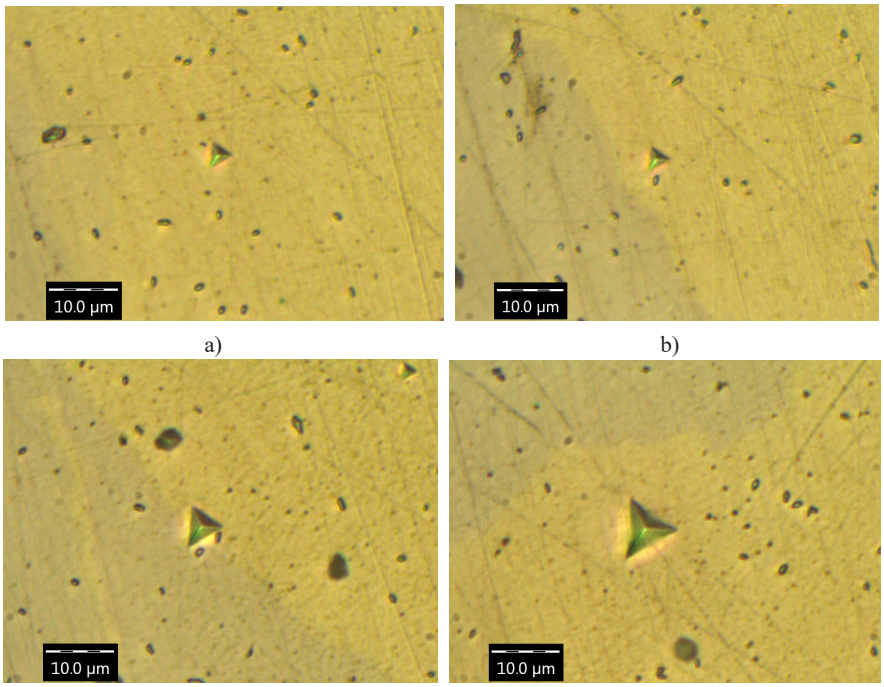
Rys. 5. Rozkłady mikrotwardości na przekroju poprzecznym próbek poddanych badaniom HV

Uzyskane wyniki rozkładu mikrotwardości (rys. 5) wykazują wysoki poziom umocnienia staliwa Hadfielda na całym przekroju próbki, ze spadkiem twardości w strefie płyty podstawowej ze stali 15HM. Przy czym, największy stopień umocnienia występuje bezpośrednio w strefie połączenia z płytą podstawową, w związku

Copyright © 2016 Institute of Industrial Organic Chemistry, Poland

z silnym odkształceniem plastycznym staliwa Hadfielda umocnionego wybuchowo. Istotnie duży rozrzut uzyskanych wyników HV (rys. 5), świadczy też o różnorodnym umocnieniu warstwy powierzchniowej staliwa Hadfielda, w stosunku do wyników mikrotwardości stali 15HM – ze znacznie mniejszym odchyleniem standardowym uzyskanych wyników.

Dla próbki A7 wykonano dodatkowo badania nanotwardości przy użyciu nanotwardościomierza NHT2 firmy Anton Paar, udostępnionym przez firmę TECHNOLUTIONS. Zastosowane obciążenie wynosiło 50 mN, a prędkość obciążania 100 mN/min. Odciski wykonano nano-indenterem Berkovicha o podstawie trójkąta. Wybrane wyniki wykonanych badań nanotwardości wraz ze śladami odcisków przedstawiono na rys. 6.



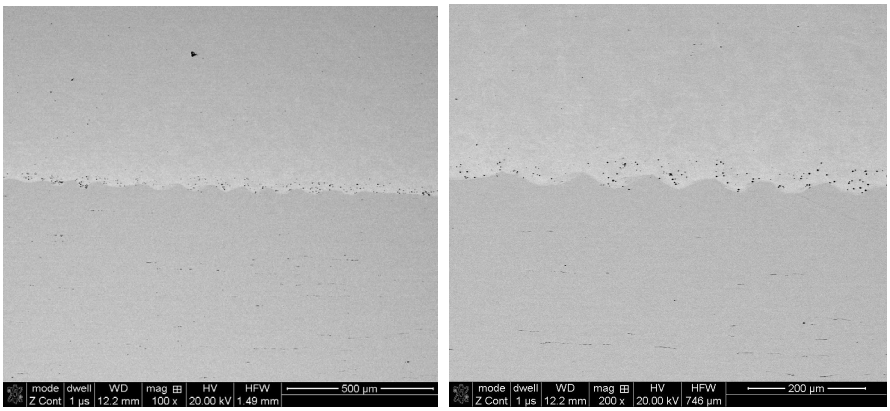
Rys. 6. Staliwo Hadfielda z odciskiem nanointendera w strefie połączenia ze stalą 15HM. Zmierzona twardość: 919,9 HVIT (a), 1026,7 HVIT (b), 849,87 HVIT (c), 300,05 HVIT (d)

Uzyskane wyniki pomiarów nanotwardości potwierdzają bardzo wysoki poziom umocnienia staliwa Hadfielda, które w strefie połączenia wynosi (800 ÷ 1000) HVIT. Przy czym uzyskany pojedynczy wynik znacząco odbiegający od pozostałych (300,05 HVIT), może świadczyć o niejednorodnym stanie umocnienia badanego materiału.

2.6. Badania struktury uzyskanych połączeń

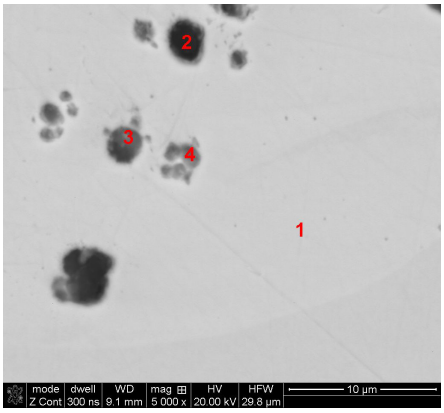
Badania strukturalne w strefie połączenia zgrzewanych materiałów wykonano przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego SEM Quanta 3D FEG z detektorem EDS. Uzyskane obrazy SEM połączenia w próbce A3 przedstawiono na rys. 7, gdzie jasny odcień szarości w obrazie BSE stanowi warstwę wierzchnią staliwa Hadfielda zgrzanego wybuchowo ze stalą kotłową 15HM.

Copyright © 2016 Institute of Industrial Organic Chemistry, Poland



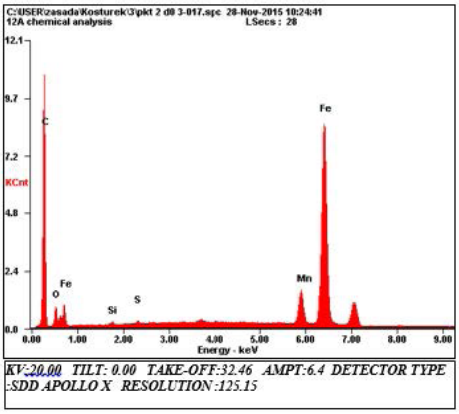
Rys. 7. Strefa połączenia w próbce A3

Analizowane obrazy w próbce A3 wykazują falową strukturę połączenia adhezyjnego, typową dla procesu zgrzewania wybuchowego, bez efektów pękania i innych nieciągłości w postaci porów. Stwierdzono jednak widoczne na zdjęciach czarne wydzielenia w strukturze staliwa Hadfielda (rys. 8), które stanowią strefy o zwiększonej zawartości tlenu i węgla, zidentyfikowane punktową mikroanalizą składu chemicznego z użyciem detektora SEM/EDS (rys. 9).



Rys. 8. Ciemne wydzielenia w strukturze staliwa Hadfielda (2, 3, 4), występujące przy obszarze połączenia

Copyright © 2016 Institute of Industrial Organic Chemistry, Poland

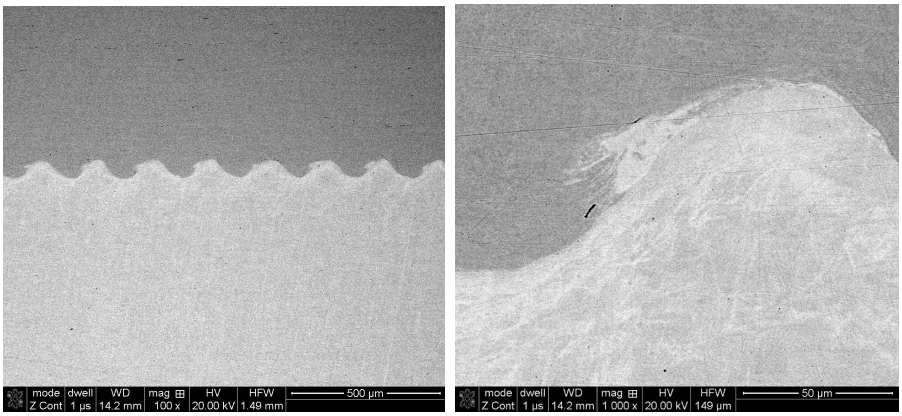


Element	Wt %	At %
C K	13.70	39.99
O K	03.46	07.59
SiK	00.30	00.38
S K	00.24	00.26
MnK	10.31	06.58
FeK	71.99	45.21

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLESS .SEC
TABLE : USER

Rys. 9. Przykładowe widmo punktowej mikroanalizy składu chemicznego staliwa Hadfielda w punkcie 2 na rys. 8

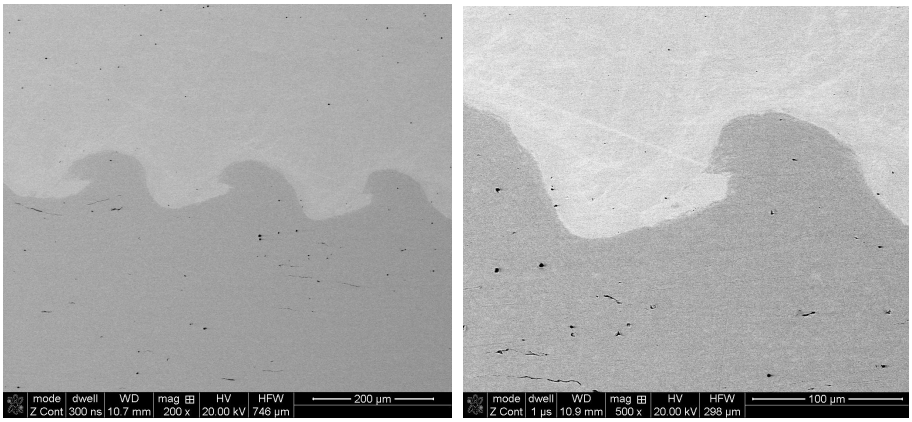
Bardzo mocno falista struktura połączenia dla próbek A5 (rys. 10) i A7 (rys. 11) – o silnym rozwinięciu powierzchni w strefie połączenia zgrzanych wybuchowo materiałów – bez oznak nieciągłości, świadczy bez wątpienia o bardzo silnym charakterze połączenia adhezyjno-dyfuzyjnego z obserwowanymi obszarami białych stref staliwa Hadfielda zakotwiczonych w stali 15HM w wyniku oddziaływania fali uderzeniowej (rys. 10).



Rys. 10. Połączenie w próbce A5

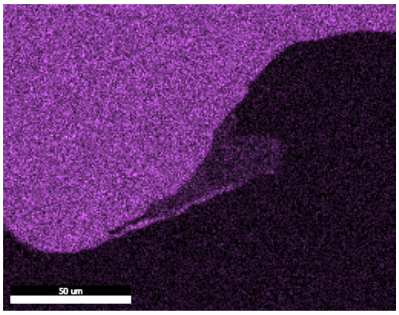
Należy podkreślić, że poprzez oddziaływanie fali detonacyjnej podniesiona zostaje też temperatura warstwy wierzchniej łączonych wybuchowo materiałów, co ogranicza gradient naprężeń własnych. Jakkolwiek zastosowane warunki obciążenia detonacyjnego z ciśnieniem dynamicznym rzędu (7 ÷ 10) GPa [6, 8] wywołują bardzo silny wzrost gęstości defektów strukturalnych i zauważalne w otrzymanych obrazach połączenia próbki A7 mikropęknięcia – ulokowane w strefie WW stali 15HM (rys. 11).

Copyright © 2016 Institute of Industrial Organic Chemistry, Poland

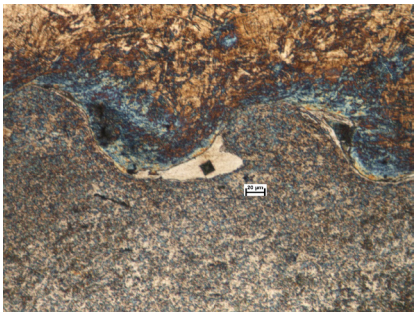


Rys. 11. Połączenie w próbce A7

Przeprowadzona powierzchniowa mikroanaliza składu chemicznego w tej strefie (rys. 12), wykazuje zwiększoną zawartość manganu, w stosunku do stali 15HM w stanie wyjściowych (przed procesem zgrzewania wybuchowego). Pośrednio potwierdza to hipotezę zachodzących zjawisk dyfuzji w obszarze WW stali 15HM, wykazującej też bardzo dużą twardość – ok. 910 HV (rys. 13).



Rys. 12. Mapa rozkładu manganu w obszarze połączenia

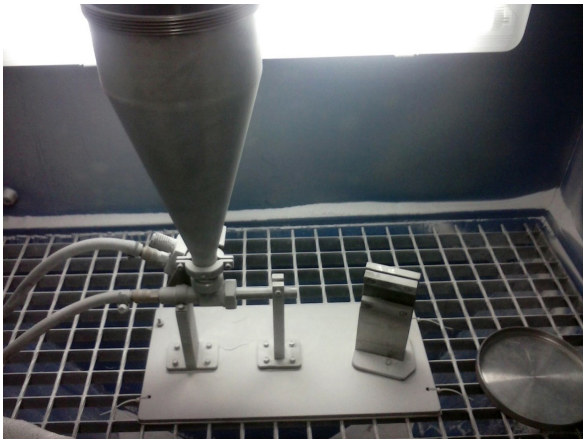


Rys. 13. Faza przejściowa w próbce A7 po trawieniu odczynnikiem Kallingsa, z odciskiem po badaniu mikrotwardości

2.7. Badania erozyjne

Badania erozyjne przeprowadzono na urządzeniu własnej konstrukcji KZMiT WAT, z dyszą erozyjną usytuowaną w odległości ok. 10 mm od badanej próbki, ustawionej pod kątem 30° do wylotu dyszy (rys. 14). Porywane przez strumień powietrza cząstki ścierniwa uderzając w powierzchnię próbki powodują jej erozję. W badaniach, jako ścierniwo użyto elektrokorund o wielkości ziaren (53 ÷ 75) µm, oddziałujący przy stałym wydatku 450 g – w odniesieniu do każdej próby zużywania erozyjnego, przeprowadzonej w czasie 100 s przy natężeniu przepływu strumienia sprężonego powietrza pod ciśnieniem 1 bar.

Copyright © 2016 Institute of Industrial Organic Chemistry, Poland



Rys. 14. Urządzenie do badań erozyjnych

Badane próbki myto w acetonie z użyciem myjki ultradźwiękowej, suszono i ważono każdorazowo przed i po wykonanym badaniu. Na podstawie uzyskanych wyników określono ubytek masy stanowiący masowe zużycie erozyjne (Ew), obliczone ze wzoru:

$$Ew = \frac{\Delta m}{m_p} \tag{2}$$

gdzie: Δm – ubytek masy próbki, [g], m_p – masa ścierniwa wykorzystanego w teście, [g]. W badaniach erozyjnych jako materiał referencyjny wykorzystano stal sprężynową 65G stosowaną na koła bijakowe młyna wentylatorowego w kotle pyłowym, której zużycie porównano do próbek zgrzanych wybuchowo. W badaniach zastosowano 3 próbki stali 65G oznaczone odpowiednio: 65G-1, 65G-2 oraz 65G-3 i zgrzane wybuchowo próbki o oznaczeniach (A3-1, A3-2, A3-3, A5-1, A5-2, A5-3, A7-1, A7-2 oraz A7-3), poddane oddziaływaniu strumienia erozyjnego na powierzchni staliwa Hadfielda. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Wyniki badań erozyjnych

Nazwa próbki	Masa początkowa [g]	Ubytek masy [g]	Względne masowe zużycie erozyjne
65G-1	22,974	0,086	0,000191
65G-2	23,167	0,099	0,000220
65G-3	24,061	0,094	0,000209
A3-1	42,922	0,066	0,000147
A3-2	40,578	0,057	0,000127
A3-3	38,683	0,051	0,000113
A5-1	41,431	0,069	0,000153
A5-2	40,729	0.061	0,000135
A5-3	36,578	0,071	0,000158
A7-1	43,998	0,059	0,000131
A7-2	37,752	0,058	0,000129
A7-3	37,003	0,061	0,000135

Uzyskane wyniki przeprowadzonych badań (tab. 3) wykazują średnio 34% mniejsze zużycie masowe staliwa Hadfielda umocnionego wybuchowo, w stosunku do stali 65G stosowanej na elementy koła bijakowego ulegającego bardzo intensywnemu zużywaniu erozyjnemu w warunkach pracy młyna wentylatorowego w Elektrociepłowni Żerań.

Copyright © 2016 Institute of Industrial Organic Chemistry, Poland

3. Podsumowanie

Wykorzystane w badaniach amonale pozwoliły pomyślnie przeprowadzić proces zgrzewania wybuchowego stali 15HM ze staliwem Hadfielda, o bardzo dobrym połączeniu metalurgicznym bez pęknięć i innych nieciągłości w postaci mikroporów. Zastosowany emulsyjny materiał wybuchowy miał zbyt dużą prędkością detonacji (ok. 5350 m/s w stosunku do prędkości dźwięku w stali wynoszącej ok. (4600 ÷ 5000) m/s) [17].

Przeprowadzone badania twardości wykazały bardzo duży stopień umocnienia staliwa Hadfielda – z maksymalną wartością HV w strefie połączenia ze stalową płytą. Badania strukturalne wykazały adhezyjno-dyfuzyjny charakter połączenia zgrzewanych wybuchowo materiałów, z niejednorodnością składu chemicznego i wzmożonym udziałem zawartości manganu w strukturze o falowym charakterze uzyskanego złącza.

Uzyskane wyniki badań erozyjnych wykazały powyżej 34% wzrost odporności erozyjnej umocnionego wybuchowo staliwa Hadfielda w bimetalicznym złączu wybuchowym, w stosunku do obecnie stosowanego materiału na koła bijakowe (stal 65G) – ulegające intensywnemu zużywaniu w warunkach pracy młyna wentylatorowego w Elektrociepłowni Żerań.

W świetle uzyskanych wyników, badane materiały platerowane wybuchowo mogą stanowić alternatywę dla stosowanej obecnie stali 65G – ulegającej zużyciu erozyjnemu.

Literatura

[1] Blazynski T.Z. 2012. *Explosive welding, forming and compaction.* London : Applied Science Publisher; ISBN 978-94-011-9753-3.

[2] Ezra A.A. 1973. *Principles and practices of explosive metalworking.* Industrial Newspaper, London; ISBN 978-0901994059.

[3] Walczak Włodzimierz. 1989. *Zgrzewanie wybuchowe metali.* Warszawa : Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; ISBN 83-204-1133-5.

[4] Rinehart J.S., Pearson J. 1963. *Explosive working of metals.* London : Pergamon; ISBN 978-0080101699

[5] Jerzy Nowaczewski, Bartłomiej Bozik, Rafał Pluta, Jacek Rudnicki. 2010. Zgrzewanie wybuchowe płytek metalowych w celu uzyskania wielowarstwowych kompozytów. Materiały Wysokoenergetyczne (2) : 43-48.

[6] Babul Wiktor, Ziemba Stefan. 1972. *Materiały wybuchowe w technologicznych procesach obróbki tworzyw.* Warszawa : Państwowe Wydawnictwo Naukowe.

[7] Dyja Henryk, Maranda Andrzej, Trębiński Radosław. 2001. *Zastosowania technologii wybuchowych w inżynierii materiałowej.* Częstochowa : Wydawnictwo Wydziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Politechniki Częstochowskiej; ISBN 83-87745-11-1.

[8] Babul Wiktor. 1980. *Odkształcanie metali wybuchem*. Warszawa : Wydawnictwa Naukowo- Techniczne; ISBN 83-204-0231-X.

[9] Drożdż T., Sochaczewski W., Bombik Z. 1979. *Badania nad zastosowaniem zgrzewania wybuchowego do wytwarzania blach bimetalicznych ze stopów CuSn5/AgPd30.* Materiały Elektroniczne 1 : 24-31.

[10] Stiepanow W.C., Sipilin P.M., Nawagin Ju. S., Pankratow W.P. 1968. *Tłoczenie wybuchowe.* Warszawa : Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.

[11] Manikandan P., Lee J.O., Mizumachi K., Mori A., Raghukandan K., Hokamoto K. *Underwater explosive welding of thing tungsten foils and copper.* Journal of Nuclear Materials, 2011, 418.

[12] Dyja Henryk, Sawicki Sylwester. 2011. *Wytwarzanie prętów bimetalowych metodą zgrzewania wybuchowego.* Obróbka Plastyczna Metali 22 (2) : 111-119.

[13] Dyja Henryk, Maranda Andrzej, Nowaczewski Jerzy. 2002. *Amonale – tanie i bezpieczne materiały wybuchowe w wysokoenergetycznej obróbce metali*. Inżynieria Materiałowa 23, 5.

[14] Mróz S., Zaskórska A., Gałka A., Bajor T. 2013. *Wytwarzanie bimetalowych prętów magnez-aluminium metodą zgrzewania wybuchowego*. Rudy Metali 58 (11) : 664-667.

[15] Sawicki Sylwester, Mróz S., Dyja Henryk, Maranda Andrzej, Nowaczewski Jerzy. 2010. *Wytwarzanie*

Copyright © 2016 Institute of Industrial Organic Chemistry, Poland

bimetalowych prętów stal-stal odporna na korozję metodą zgrzewania wybuchowego. Hutnik-Wiadomości Hutnicze 77 (9) : 526-528.

[16] Kulakovska G., Gwoździk M., Nitkiewicz Z., Zygoń P. 2013. *Charakterystyka złącza otrzymanego metodą wybuchową.* Hutnik-Wiadomości Hutnicze 80 (2) : 161-165.

[17] Klimpel Andrzej. 2000. *Napawanie i natryskiwanie cieplne.* Warszawa : Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; ISBN 83-204-2509-3.

[18] Findik Fehim. 2011. *Recent developments in explosive welding*. Materials and Design 32 (3) : 1081-1093.

[19] Klimpel Andrzej. 1999. *Technologie zgrzewania metali i tworzyw termoplastycznych*. Gliwice : Wyd. Politechniki Śląskiej; ISBN 83-85718-39-7.

[20] Stradomski Zbigniew. 2000. *Mikrostrukturalne aspekty wybuchowego umacniania staliwa Hadfielda.* Częstochowa : Wydawnictwo Wydziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Politechniki Częstochowskiej; ISBN 83-87745-70-7.

[21] Maranda Andrzej, Gołąbek Barbara, Suszka Jacek, Zawadzka-Małota Iwona, Sałaciński Tomasz. 2013. *Badanie charakterystyk detonacyjnych materiałów wybuchowych emulsyjnych typu hydromite*. Chemik 67 (1) : 7-12.

[22] Bednarczyk Ewelina, Maranda Andrzej, Paszula Józef, Papliński Andrzej. 2016. *Badanie wpływu pyłu aluminiowego na wybrane parametry materiałów wybuchowych emulsyjnych uczulanych mikrobalonami*. Chemik 70 (1) : 41-50.

Received: 22nd June 2016
Accepted: 25th November 2016
Published: 30th December 2016

Copyright © 2016 Institute of Industrial Organic Chemistry, Poland