

Materiały Wysokoenergetyczne / High-Energetic Materials, 2015, 7, 73 – 79
ISSN 2083-0165

Zastosowanie technologii wybuchowego platerowania metali do wytwarzania nowych zaawansowanych materiałów warstwowych na przykładzie połączenia tytan Ti6Al4V – aluminium AA2519

Application of explosive metal cladding in manufacturing new advanced layered materials on the example of titanium Ti6Al4V – aluminum AA2519 bond

Aleksander Galka

Zakład Technologii Wysokoenergetycznych „Explomet” Galka, Szulc Sp. J.,
ul. Oświęcimska 100H, 45-641 Opole, PL
E-mail: agalka@op.onet.pl

Streszczenie: *Technologia wybuchowego platerowania metali rozwija się intensywnie od połowy minionego wieku. Jest to dziedzina produkcji, w której cywilne zużycie materiałów wybuchowych (MW), poza górnictwem, jest największe. Światowa produkcja platerów wytwarzanych tą metodą wynosi dziesiątki tysięcy metrów kwadratowych w skali roku. Łączenie wybuchowe pozwala na wytwarzanie najszerzej gamy międzymetalicznych kompozycji i w wielu przypadkach nie ma dla siebie alternatywy. Przykładem takich materiałów warstwowych są platerzy z udziałem metali lekkich jak tytan, aluminium, magnez, różniących się znacznie temperaturami topnienia, gęstością, twardością. Każda nowa kombinacja materiałowa wymaga odpowiedniej adaptacji technologii poprzez dobór właściwych parametrów spajania i często odpowiednio zmodyfikowanych nowych materiałów wybuchowych. Opracowano technologię wybuchowego łączenia stopów Ti6Al4V i AA2519 w różnych wariantach konstrukcyjnych. Platerzy przebadano przeprowadzając testy nieniszczące i niszczące, oceniając spójność oraz wytrzymałość mechaniczną uzyskanego połączenia. Celem prowadzonych prac było wytworzenie nowych materiałów o podwyższonej odporności balistycznej na konstrukcje lotnicze i kosmiczne.*

Abstract: *Explosive metal cladding technology is developing intensively since the middle of the last century. It is a manufacturing area in which the civil usage of explosives, not taking mining into account, is the biggest. World production of clad materials manufactured using this method is counted in tens of thousands square meters every year. Explosive bonding enables producing the widest range of intermetallic compositions and in many cases has no alternative. An example of such layered materials are clads featuring light metals such as titanium, aluminum, magnesium, which differ significantly in melting temperatures, density and hardness. Each new material combination requires appropriate technology adaptation by means of selecting the optimal bonding parameters and often appropriately modified new explosive materials. Technology enabling explosive bonding of Ti6Al4V and AA2519 alloys in various construction scenarios was worked out. The clads were tested by means of destructive and non-destructive testing, assessment of bond integrity and mechanical endurance of the obtained bond. The goal of the performed research was to manufacture new materials with enhanced ballistic resistance for aerospace and space construction.*

Słowa kluczowe: *platerowanie wybuchowe, prędkość detonacji, plater Ti6Al4V-AA2519*

Keywords: *explosive cladding, detonation velocity, Ti6Al4V- AA2519 clad*

1. Wprowadzenie

Technologia wybuchowego platerowania metali jako najbardziej uniwersalna metoda wytwarzania różnego rodzaju połączeń międzymetalicznych daje możliwości uzyskania kombinacji materiałowych niemożliwych do uzyskania innymi sposobami. Jej intensywny rozwój datuje się od połowy minionego wieku. Skala produkcji platerów tą metodą dostosowuje się do światowych trendów dynamiki rozwoju gospodarczego i generalnie wykazuje tendencję wzrostową. Wytwarzane bimetały i różnego rodzaju kompozycje wielowarstwowe znajdują szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach gospodarki, głównie w przemyśle budowy aparatury chemicznej, procesowej oraz w przemyśle stoczniowym. Uniwersalność tej metody wynika z faktu możliwości łączenia ze sobą metali znacząco różniących się między sobą właściwościami takimi jak temperatura topnienia, gęstość, aktywność chemiczna i w wielu przypadkach nie posiada ona alternatywy. Przykładem takiego połączenia są materiały bimetaliczne złożone ze stopów tytanu i stopów aluminium [1-3]. Stopy te same w sobie są doskonałym tworzywem konstrukcyjnym dzięki wysokiej wytrzymałości i małej gęstości, jednak ich trwałe metalurgiczne połączenie może dać nowy kompozyt o ciekawych właściwościach użytkowych.

W ramach projektu badawczego współfinansowanego przez NCBiR o roboczym tytule: „*Nowe zaawansowane materiały warstwowe Al-Ti o podwyższonej odporności balistycznej na konstrukcje lotnicze i kosmiczne*” postanowiono wytworzyć metodą wybuchowego platerowania bimetal Ti6Al4V/stop aluminium AA2519 i kompleksowo go przebadać. Prace te trwają od roku 2014 i będą kontynuowane do roku 2016 w ramach naukowo-przemysłowego konsorcjum, którego członkami są:

- a) Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie,
- b) Instytut Metali Nieżelaznych w Gliwicach,
- c) Centrum Badań Kosmicznych PAN w Warszawie,
- d) Politechnika Warszawska,
- e) Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy,
- f) Zakład Technologii Wysokoenergetycznych Explomet w Opolu.

W chwili obecnej harmonogram zaplanowanych przez Explomet prac jest już praktycznie na półmetku. Wytworzony materiał został poddany badaniom mikrostrukturalnym, nieniszczącym, mechanicznym oraz wybranym testom odporności balistycznej. Przedstawione tutaj wyniki są częściowym wycinkiem prac zrealizowanych do tej pory przez ZTW Explomet.

2. Materiały i metody

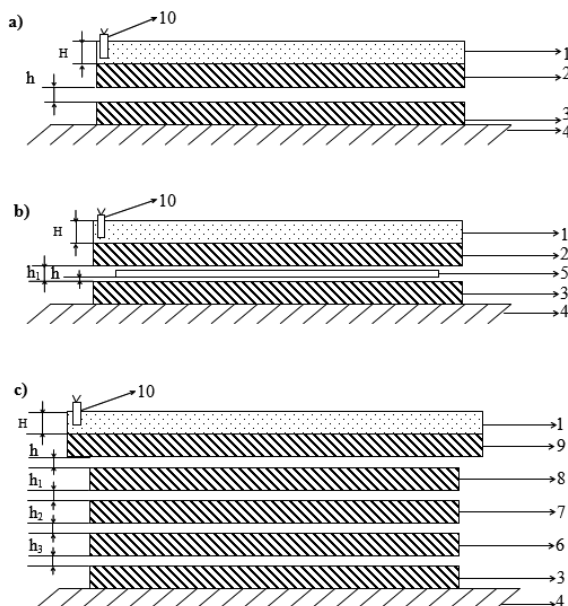
Wdrożenie do produkcji każdej nowej kombinacji materiałowej wiąże się z koniecznością odpowiedniej adaptacji dotychczas stosowanej technologii. Składa się na to dobór właściwych parametrów zgrzewania wybuchowego, które zależą m. in. od rodzaju zastosowanych materiałów wybuchowych (MW), ich ilości oraz uwarunkowań konstrukcyjnych układu zgrzewania. Wykonanie prób spajania poprzedzone zostało serią testów różnego rodzaju mieszanin dla ich właściwego doboru pod względem odpowiednich parametrów wybuchowych. Badano materiały wytworzone na bazie saletry amonowej i paliwa węglowodorowego z dodatkami substancji inertnych jak chlorek sodu czy krzemionka. Tego typu mieszaniny są najczęściej stosowanymi MW w technologii wybuchowego platerowania metali. Profilaktycznie kontroli poddano poziom wrażliwości wybranych mieszanin na bodźce mechaniczne oraz podjęto próby oceny ich parametrów fali detonacyjnej z użyciem metody elektromagnetycznej [4-6]. Szczególnie dużo uwagi poświęcono przestrzelaniu zaprojektowanych MW w warunkach poligonowych, badając ich prędkość detonacji w różnym zakresie grubości warstw ładunków. Właściwości użytkowe MW, w tym prędkość detonacji, są pochodną ich składu chemicznego, postaci fizycznej ich poszczególnych składników, np. rozdrobnienia, stopnia rozwinięcia powierzchni porów obecnych w strukturze kryształów stosowanej saletry amonowej oraz jakości ich wymieszania. Składy chemiczne badanych mieszanin podano w tabeli 1.

Tab. 1. Składy chemiczne testowych mieszanin wybuchowych

Lp.	Oznaczenie MW	Skład chemiczny [% wag.]				
		Saletra amonowa mielona	Saletra amonowa gran./mielona 1:1	Paliwo węglowodorowe	NaCl	SiO ₂
1	Saletrol 1	-	95	5	-	-
2	Saletrol 2	-	76	4	20	-
3	Saletrol 3	-	76	4	-	20
4	Saletrol 4	-	78,4	1,6	20	-
5	Saletrol 5	-	79,2	0,8	20	-
6	Saletrol 6	-	79,2	0,8	-	20
7	Saletrol 7	76	-	4	20	-
8	Saletrol 8	76	-	4	-	20
9	Saletrol 9	79,2	-	0,8	20	-
10	Saletrol 10	79,2	-	0,8	-	20
11	Saletrol 11	69,3	-	0,7	-	30

Założony plan prób platerowania przewidywał wykonanie złączy bimetalicznych obejmujących układy dwuwarstwowe Ti6Al4V/AA2519: 3 mm+3 mm (seria „3”), 5 mm+5 mm (seria „5”), 10 mm+10 mm (seria „10”) oraz układy wielowarstwowe (seria „3M”). Próby spajania wykonane zostały przy zastosowaniu równoległego układu zgrzewania (rys. 1) w następujących wariantach łączenia:

- łączenie bezpośrednio Ti6Al4V/AA2519,
- łączenie Ti6Al4V/AA2519 z oddzielną przekładką 1 mm z aluminium 1050,
- łączenie Ti6Al4V/AA2519 z oddzielną przekładką 0,8 mm z tytanu Gr 2,
- łączenie Ti6Al4V/AA2519 z użyciem stopu 2519 z nawalcowaną metodą hutniczą warstwą Al1050.



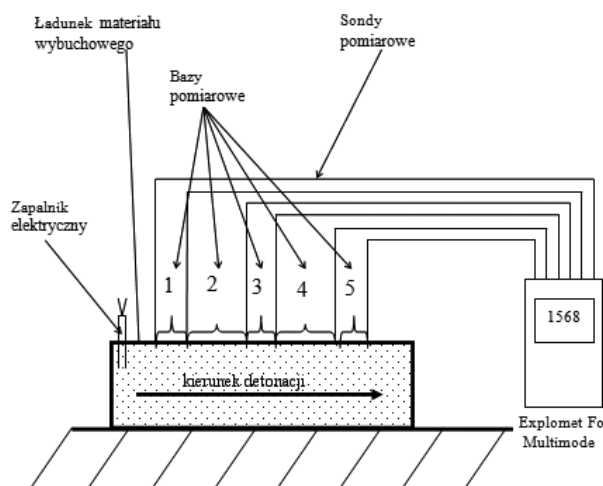
Rys. 1. Układ wybuchowego platerowania blach: a) zgrzewanie bezpośrednie; b) zgrzewanie z przekładką; c) zgrzewanie wielowarstwowe: H – wysokość warstwy MW; h, h₁, h₂, h₃ – drogi napędzania blachy napędzanej; 1 – MW; 2 – płyta nakładana; 3 – płyta podstawowa; 4 – podłoże/kowadło; 5 – przekładka (interlayer); 6, 7, 8 – kolejne płyty nakładane; 9 – płyta napędzana; 10 – zapalnik elektryczny

3. Część eksperymentalna

Jak się można było spodziewać wykonane badania wrażliwości zaprojektowanych mieszanin na bodźce mechaniczne potwierdziły możliwość ich bezpiecznego wykonania i stosowania w procesie platerowania wybuchowego. Poziom wrażliwości, na uderzenie wynosił min. 10 J, natomiast przy obciążeniu 360 N materiały te nie wykazywały wrażliwości na tarcie.

Pomiary parametrów fali detonacyjnej metodą elektromagnetyczną miały na celu określenie wpływu zmiennych składów MW na dynamikę ich przemiany w strefie fali detonacyjnej. Wykonane testy wykazały jednak, że stosowanie tej metodyki badawczej dla MW wykonanych na bazie saetry amonowej o niskich prędkościach detonacji, cechujących się zwłaszcza niezrównoważonym bilansem tlenowym i zwiększoną zawartością składników inertnych daje wyniki trudne do interpretacji i obciążone dużym marginesem błędu. Otrzymywane krzywe prędkości masowej znacząco odbiegają swoim profilem od sygnałów obserwowanych dla silniejszych materiałów homogenicznych. Dynamika progresji ciśnienia na froncie fali uderzeniowej w ładunku jest rozciągnięta w czasie, obserwuje się liczne fluktuacje rejestrowanego impulsu. Taki stan rzeczy spowodowany jest złożonością reakcji chemicznych przebiegających w strefie fali detonacyjnej wieloskładnikowych mieszanin, zawierających substancje niewybuchowe i wydłużonym czasem ich reakcji. Przeprowadzona analiza porównawcza potwierdziła jedynie, że dla MW o zrównoważonym bilansie tlenowym, podwyższenie zawartości inertu w ich składzie obniża ciśnienie detonacji i zwiększa szerokość pików chemicznych. Dodatkowo zmniejszenie ilości paliwa w składzie mieszaniny przyczynia się do jeszcze większego obniżenia jej wydatku energetycznego, tj. spada ciśnienie detonacji, skraca się czas trwania reakcji chemicznej w strefie oddziaływania fali detonacyjnej. Rodzaj inertu i sposób jego przemiany w strefie fali detonacyjnej wpływa na kształt pików chemicznych. Obecność chlorku sodu w składzie MW, z uwagi na jego względnie niską temperaturę topnienia, powoduje, że pik chemiczny fali detonacyjnej jest nieco większy niż w przypadku zastosowania krzemionki. Zaobserwowane różnice powinny mieć wpływ na proces platerowania wybuchowego i mogą być pomocne w interpretacji uzyskanych wyników. Niejednokrotnie sam pomiar prędkości detonacji MW dla różnych składów chemicznych daje zbliżone wyniki, jednak w procesie platerowania wybuchowego można zaobserwować odmienne rezultaty widoczne w morfologii uzyskanego złącza, które najprawdopodobniej są wynikiem zmiennego czasu oddziaływania podwyższonych parametrów termodynamicznych produktów detonacji.

Do pomiaru prędkości detonacji zaprojektowanych mieszanin wykorzystano wielokanałowy miernik optyczny Explomet Fo Multimode, umożliwiający pomiar na pięciu kolejnych bazach. Schemat wykonania pomiaru przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Schemat układu do pomiaru prędkości detonacji

Użytkową grubość stosowanych ładunków przyjęto w zakresie od 25 mm do 100 mm z rekomendowaną prędkością detonacji w przedziale od 1800 m/s do 3000 m/s. Wyniki wykonanych i uśrednionych pomiarów prędkości detonacji dla testowanych wysokości warstw zawiera tabela 2.

Tab. 2. Uśrednione wyniki pomiarów prędkości detonacji D [m/s] (wartość $/x$ oznacza ilość powtórzeń pomiaru z dokładnością do 10 m/s) dla badanych próbnich mieszanin MW

Oznaczenie MW	Wysokość ładunku H [mm]						
	30	40	50	60	70	80	100
Saletrol 1	2539/3	-	-	-	-	-	-
Saletrol 2	2048/3	2126/3	2235/3	-	-	-	3044/3
Saletrol 3	-	2053/3	2172/3	2415/3	-	-	-
Saletrol 4	-	2280/4	-	2480/3	-	-	-
Saletrol 5	1826/4	-	1953/3	2206/3	2366/3	2574/3	2716/3
Saletrol 6	-	-	1922/3	-	-	-	-
Saletrol 7	2033/3	2339/3	2349/3	-	-	-	-
Saletrol 8	1994/3	-	2283/3	-	-	-	-
Saletrol 9	1854/3	2000/4	2052/3	2398/3	-	2454/2	-
Saletrol 10	1820/4	-	1942/3	-	-	-	-
Saletrol 11	-	-	-	-	2140/3	2380/3	2581/3

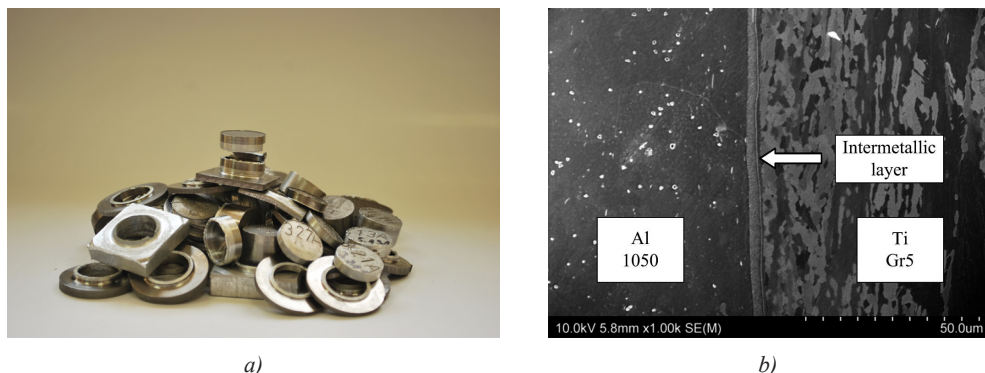
Platerowaniu poddano płyty próbne o wymiarach 300x500 mm lub 500x500 mm. Dla każdej grubości łączonych blach stosowano odmienną wielkość warstwy MW, dostosowaną do masy płyty napędzanej. Wszystkie warianty łączenia przeprowadzono w jednym akcie strzałowym. Do wykonania układów wielowarstwowych wykorzystano platery hutnicze 1050/AA2519/1050. Jedną z partii wykonanych płyt próbnych przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Partia wykonanych płyt próbnych Ti6Al4V/AA2519

Wykonane platery (rys. 4) poddano szczegółowej ocenie obejmującej:

- badania ultradźwiękowe na ciągłość złącza, wykonane głowicami prostymi i z zastosowaniem metody Phased Array,
- badania wytrzymałości mechanicznej obejmujące próbę rozciągania, gięcia, odrywania (R_0 [MPa]),
- pomiary mikrotwardości w różnych stanach obróbki cieplnej,
- ocenę mikrostruktury złącza z wykorzystaniem mikroskopii elektronowej, dla określenia ilości faz międzymetalicznych, wyrażonych wskaźnikiem równoważnej grubości przetopień (RGP).



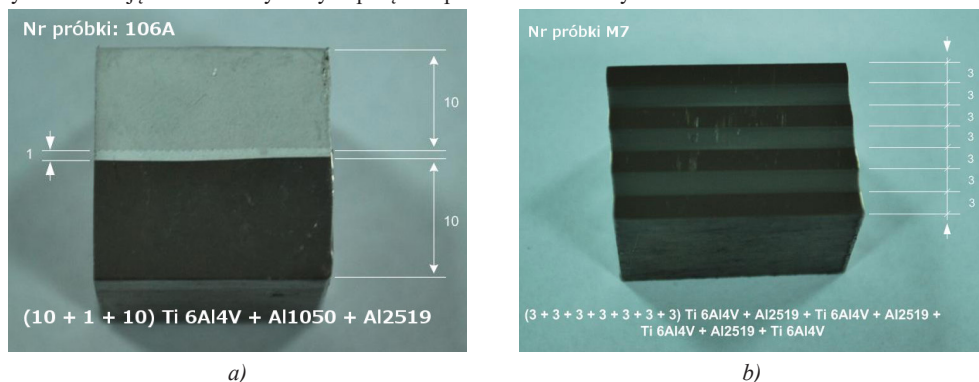
Rys. 4. Badane próbki: a) po próbach odrywania; b) próbka 32A widoczna w projekcji SEM

Zbiorecze dane wybranych warunków wykonania i uzyskanych wyników badania dla płyt próbnych o najlepszej jakości podaje tabela 3.

Tab. 3. Zbiorecze dane warunków wykonania i wyników badań wybranych płyt próbnych

Nr próby	MW	H [mm]	h ₁ [mm]	h ₂ [mm]	D [m/s]	R ₀ [MPa]	złom	RGP [um]
3.10A	S2	30	2	10	2039	156	Al1050	1,6
3.17PL	S9	40	4,5	-	2027	155	Al1050	1,7
5.5A	S2	30	1,5	15	1982	185	Al1050	3,9
10.6A	S9	60	1,5	25	2401	171	Al1050	5,9
10.9PL	S9	50	15	-	1969	214	Al1050	7,2
M7	S5	100	6 x 3 mm		2730	143	Al1050	-

Przykładowe zdjęcia makro uzyskanych połączeń przedstawiono na rys 5.



Rys. 5. Makro próbki: a) 106A; b) M7

4. Dyskusja wyników

Wykonane badania wytworzonych platerów potwierdzają poprawność przyjętych założeń technologicznych wykonania procesu platerowania wybuchowego stopu AA2519 i stopu Ti6Al4V. Spośród wykonanych 80-ciu płyt jedynie w siedmiu przypadkach nie uzyskano trwałego połączenia, które umożliwiłoby wykonanie zaplanowanych badań kontrolnych. Wszystkie warianty łączenia zarówno bezpośredniego jak i z udziałem plastycznej przekładki z Al1050 lub TiGr2 są możliwe do przeprowadzenia. Złącza bezpośrednie cechuje wysoka wytrzymałość mechaniczna, jednak ich zasadniczym mankamentem jest niska plastyczność w strefie zgrzania i podatność na pęknięcie w trakcie operacji prostowania blach. Wynikowa powierzchnia zachowanego połączenia

po prostowaniu może w tym przypadku ulec zmniejszeniu nawet o 50% w stosunku do stanu wyjściowego. Zjawisko to narasta wraz ze wzrostem grubości łączonych blach. Zastosowanie w przyszłości operacji obróbki cieplnej może nie przynieść spodziewanego efektu poprawy plastyczności strefy połączenia z uwagi na możliwość tworzenia się kruchych faz międzymetalicznych pomiędzy oboma materiałami stopowymi. Wariant bezpośredniego łączenia należy wyeliminować z toku kolejnych prac badawczych.

Zastosowanie miękkiej przekładki metalicznej z Al1050 i TiGr2 przetestowano dla płyt próbnych serii „3” i serii „5”. W obu przypadkach otrzymano wysokiej jakości połączenia, chociaż stwierdzono, że zastosowanie TiGr2 wymaga większej dokładności w zachowaniu geometrycznych parametrów układu wybuchowego niż w przypadku stosowania Al1050. Odstępstwa od założonych wielkości, spowodowane większą krzywizną blachy mogą skutkować brakiem połączenia. Czynnikiem ten może mieć duże znaczenie podczas wykonywania platerów większych rozmiarów. Ciekawym spostrzeżeniem zaobserwowanym podczas prób zgrzewania był fakt większego pochłaniania energii zderzenia dla płyt wykonanych z przekładką z aluminium 1050 w stosunku do płyt wykonanych z przekładką z TiGr2. Płyty wykonywane w tych samych warunkach miały temperaturę o ponad 40 °C niższą w przypadku zastosowania Al1050, co świadczy o energochłonnej deformacji strukturalnej miękkiego materiału przekładki. Płyty takie mogą stanowić lepszą osłonę balistyczną pod warunkiem, że nie mamy do czynienia z ich perforacją w trakcie próby przebicia. Kolejnym argumentem przemawiającym za stosowaniem Al1050 jest jego cena, która jest około 10 krotnie niższa niż cena tytanu. Biorąc pod uwagę powyższe względy, należy założyć w kolejnym etapie realizacji prac badawczych stosowanie przekładki z Al1050.

W trakcie prowadzonych testów ujawniono ciekawą pozytywną cechę gradientowych układów wielowarstwowych Ti6Al4V/AA2519. Wykazały one bowiem znacznie zwiększoną odporność na penetrację przez ładunki kumulacyjne w stosunku do osłon stalowych. Właściwość ta będzie dokładnie badana w kolejnym etapie realizacji projektu badawczego.

5. Wnioski

Uzyskane wyniki wskazują na trafny dobór parametrów zgrzewania wybuchowego na obecnym etapie realizacji projektu. W trakcie kolejnych testów będą one optymalizowane w celu uzyskania połączenia o jak najwyższej jakości dla większych rozmiarów płyt, tak aby lepiej ocenić możliwość zastosowania takich bimetalii jako nowego tworzywa konstrukcyjnego w aplikacjach przemysłowych. Szczególną uwagę należy zwrócić na właściwy dobór obróbek cieplnych platerów dla usunięcia naprężeń wprowadzonych do struktury materiału w trakcie platerowania i skutecznego przeprowadzenia operacji prostowania blach oraz doprowadzenia ich do stanu maksimum ich parametrów wytrzymałościowych.

Literatura

- [1] Nowaczewski Jerzy, Bozik Bartłomiej, Pluta Rafał, Rudnicki Jacek. 2010. „Zgrzewanie wybuchowe płytek metalowych w celu uzyskania wielowarstwowych kompozytów”. *Materiały Wysokoenergetyczne 2* : 43-48.
- [2] Xia Hong-bo, Wang Shao-gang, Ben Hai-feng. 2014. „Microstructure and mechanical properties of Ti/Al explosive cladding”. *Materials & Design* 56 : 1014–1019.
- [3] Mali I. Vjacheslav, Pavliukova V. Daria, Bataev A. Ivan, Bataev A. Anatolij, Smirnov I. Alexander, Yartsev S. Pavel, Bazarkina V. Valerina. 2011. „Formation of the Intermetallic Layers in Ti-Al Multilayer Composites”. *Advanced Materials Research* (311-313) : 236-239.
- [4] Zygmunt Bogdan. 2009. „Detonation Parameters of Mixtures Containing Ammonium Nitrate and Aluminium”. *Cent. Eur. J. Energ. Mater.* 6 (1) : 57-66.
- [5] Svedor K.K, Dremin A.N.. 1966. *Vzryvnoe Delo*, 60 (17) : 33.
- [6] Maranda Andrzej, Nowaczewski Jerzy, Włodarczyk Edward, Zygmunt Bogdan. 1979. „Study on Detonation Properties of Slurry Explosives by Electromagnetic Method”. *J. Tech. Phys.* 20 (1) : 19-29.