

Obróbka wybuchowa i ciepno-chemiczna wielowarstwowych kompozytów metalicznych

Explosive and thermally-chemical processing of multilayer metallic composites

Jerzy Nowaczewski¹⁾, Milena Kita¹⁾, Justyna Świeczak¹⁾, Jacek Rudnicki²⁾

1) Wydział Nowych Technologii i Chemii, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Polska

2) Wydział Inżynierii Materiałowej, Politechnika Warszawska, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa, Polska

Streszczenie: W pracy opisano sposoby wybuchowego umacniania metali, które wykonywano w celu uzyskania wzrostu twardości otrzymanych wcześniej kompozytów, a także dla zdefektowania ich warstw wierzchnich, aby zwiększyć skuteczność dalszej obróbki ciepno-chemicznej. Omówiono typowe układy do wybuchowego umacniania metali oraz konstrukcję układu stosowanego w praktyce. Uzyskane efekty wybuchowego umacniania zilustrowano wykresami rozkładów mikrotwardości, w przekrojach poprzecznych obrabianych kompozytów, przed i po umacnianiu wybuchowym. W dalszym etapie obróbki badane próbki kompozytów poddano jarzeniowemu azotowaniu. W wyniku tego procesu, oprócz typowego wzrostu twardości poszczególnych warstw, zaobserwowano występowanie w strefie złącza fazy pośredniej o wyraźnie wyższej twardości. Wstępna analiza zdjęć i wyników ze scanningowego mikroskopu elektronowego z przystawką EDS pozwala przypuszczać, że jest to warstwa międzymetaliczna, której obecność nadaje kompozytom szczególnie korzystne właściwości.

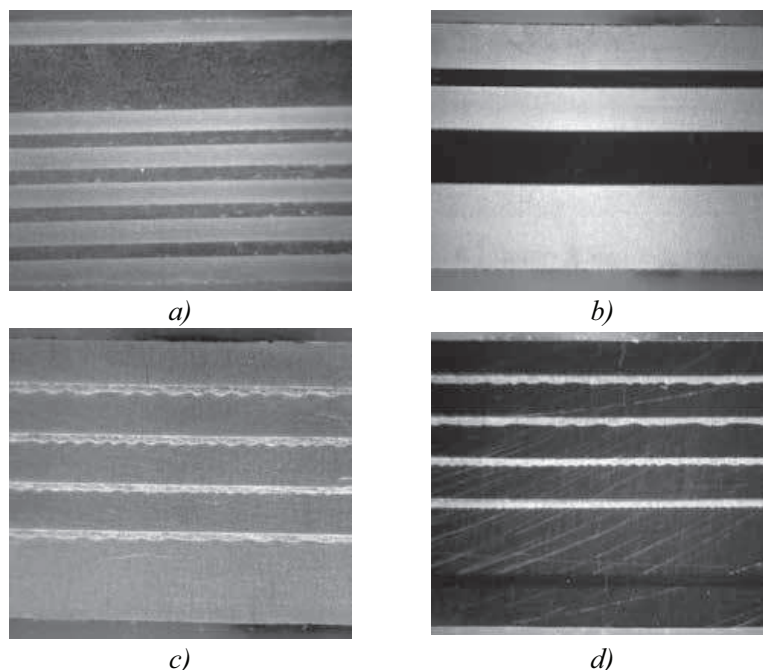
Abstract: At this paper described explosive ways of strengthening metals, which were performed in order to increase hardness of the composites obtained earlier, and also for deforming of their surface layers to further enhance the effectiveness of thermo-chemical treatment. There were discussed typical systems for explosive strengthening metals. The obtained results of explosive strengthening microhardness distributions are illustrated diagrams in the machined cross-sections of composites, before and after the consolidation of an explosive. In a further stage of processing the samples of tested composite were treated of ion nitriding. In the process, in addition to the typical increase in the hardness of each layer, was observed in the phase separation zone, an intermediate connector apparently higher hardness. Preliminary analysis of images and results from scanning electron microscope with EDS attachment, suggesting that these are the separation of intermetallic phases, whose presence gives composite layers particularly advantageous properties.

Słowa kluczowe: zgrzewanie wybuchowe, umacnianie wybuchowe metali, azotowanie jarzeniowe

Keywords: explosive welding, explosive strengthening of metals, glow-discharge nitrided

1. Kompozyty poddawane obróbce

Metodą wybuchowego zgrzewania wytwarzano wielowarstwowe kompozyty łącząc płytki tytanowe z płytkami ze stali 1H18N9 lub z płytkami aluminiowymi [1÷3]. Taki wybór metali wynikał z założenia, że na złączu odpowiednich par metali możliwe będzie powstanie fazy międzymetalicznej o korzystnych, pod względem twardości, właściwościach [4,5]. W dalszych planach, po osiągnięciu zadowalających wyników badań, przewidywano zastosowanie kompozytów w konstrukcjach opancerzenia wozów bojowych. Kompozyty uzyskiwano w taki sposób, że wybierano na początku grubszą płytkę tytanową i do niej przyłączano kolejno, na przemian, dalsze płytki aluminiowe lub stalowe. W ten sposób można było tworzyć pakiety o praktycznie dowolnej liczbie warstw. Na rys. 1 przedstawiono obrazy mikroskopowe poprzecznych przekrojów niektórych próbek tych kompozytów ilustrujące charakter połączeń poszczególnych warstw metali: tytanu (Ti), stali (St) i aluminium (Al).



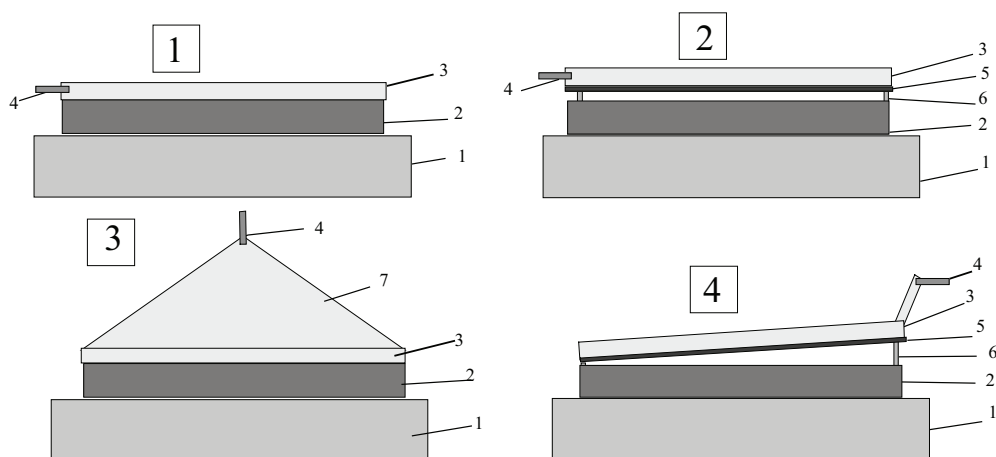
Rys. 1. Przykłady poprzecznych przekrojów wielowarstwowych kompozytów:
 a) Ti/St/Ti/St/Ti/St/Ti/St/Ti/St/Ti = 1,5/3,0/1,5/0,7/1,5/0,7/1,5/0,7/1,5/0,7/1,5 mm – 11 warstw,
 b) Ti/St/Ti/St/Ti = 1,5/0,7/1,5/2,0/3,0 mm – 5 warstw,
 c) Ti/Al/Ti/Al/Ti/Al/Ti/Al/Ti = 1,5/0,3/1,5/0,3/1,5/0,3/1,5/0,3/3,0 mm – 9 warstw,
 d) Ti/Al/Ti/Al/Ti/Al/Ti/Al/Ti/St/Ti=1,5/0,3/1,5/0,3/1,5/0,3/1,5/0,3/3,0/0,7/1,5 mm – 11 warstw

2. Wybuchowe umacnianie otrzymanych kompozytów

Wybuchowe umacnianie wykonywano w celu podwyższenia twardości i zdefektowania struktury uzyskanych wielowarstwowych kompozytów, aby osiągnąć lepsze efekty dalszej obróbki cieplno chemicznej, jaką było jarzeniowe azotowanie. Do wybuchowego umacniania stosowano cienkie, warstwowe ładunki plastycznego MW (PMW) o grubości (2 ÷ 3) mm. Głównym składnikiem PMW był drobnokrystaliczny pentryt.

Wybuchowe umacnianie najczęściej można realizować na kilka sposobów, w zależności od wartości impulsu ciśnienia jaki potrzeba wprowadzić w umacniany element lub inaczej jak dalece należy go utwardzić. Na rys. 2 przedstawiono schematy czterech podstawowych wariantów wybuchowego umacniania metali. Pierwszy z nich ilustruje najprostszy i najczęściej stosowany sposób umacniania metali polegający na oddziaływaniu na umacnianą powierzchnię produktów detonacji cienkiego ładunku silnego MW bezpośrednio przylegającego do umacnianej powierzchni. Efekt takiego umacniania jest przy tej metodzie najmniejszy, nazywany często metodą umacniania „falą skośną” wnikającą w metal. Drugi wariant umacniania polega na zastosowaniu płytki metalowej jako tzw. linera, który dzięki znacznie większej gęstości niż produkty detonacji MW, generuje znacznie wyższy impuls ciśnienia w momencie zderzenia z umacnianą powierzchnią, ale to jest również wariant „fali skośnej”. Trzeci schemat ilustruje najsilniejszy sposób umacniania wybuchowego przy użyciu pośredniego ładunku MW generującego falę płaską. Dzięki temu cała powierzchnia metalu jest jednocześnie obciążana tzw. „płaskim impulsem ciśnienia”, który najgłębiej wnika w metal i jego czas trwania jest najdłuższy. Ta metoda umacniania jest rzadko stosowana ze względu na ogromną siłę niszczącą produktów detonacji przy dłuższym kontakcie z umacnianą powierzchnią. Ostatni, czwarty wariant umacniania przedstawia sposób oddziaływania impulsu ciśnienia generowanego podczas uderzenia metalową płytką, ale dzięki odpowiedniemu ustawieniu miotanej płytki i specyficznemu pobudzaniu detonacji ładunku MW uzyskuje się efekt podobny do wariantu trzeciego przy znacznie krótszym czasie trwania obciążającego impulsu, co nie powoduje tak niszczącego działania jak w poprzednim wariantcie.

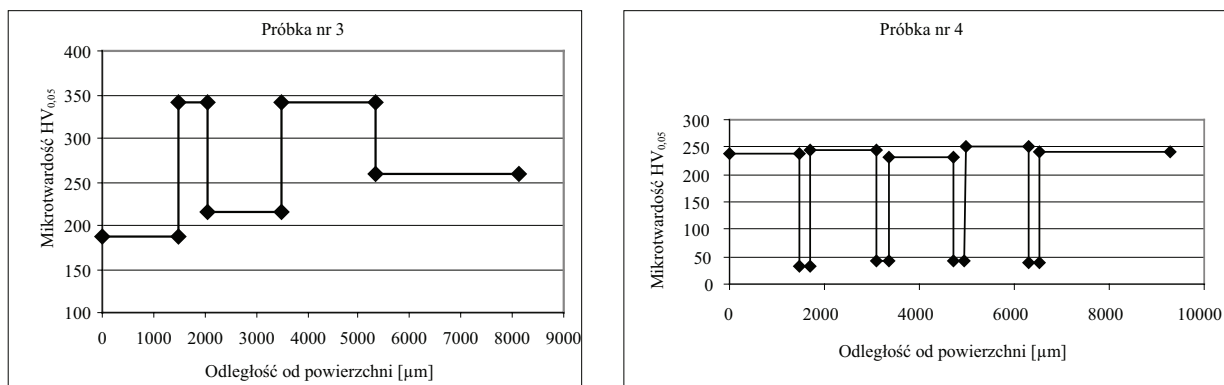
W czasie realizowanych badań stosowano dwa warianty umacniania: pierwszy i czwarty.



Rys. 2. Schematy układów do wybuchowego umacniania metali: [1] – umacnianie produktami detonacji MW bezpośrednio przylegającego do metalu; [2] – umacnianie przez uderzenie płytką metalową napędzaną produktami detonacji MW; [3] – umacnianie produktami detonacji ładunku MW pobudzonego generatorem fali płaskiej; [4] – umacnianie przez uderzenie metalową płytką napędzoną quasi płaską falą ciśnienia: 1) metalowa podstawa, 2) płyta umacniana, 3) ładunek MW, 4) zapalnik elektryczny, 5) metalowa płytka linera, 6) dystans, 7) generator fali płaskiej

3. Pomiary mikrotwardości kompozytów

Efekty zmian twardości próbek wielowarstwowych kompozytów określano na podstawie pomiarów mikrotwardości wykonywanych przy użyciu aparatu Vickersa. Do ilustracji tych zmian (rys. 3) spośród wielu kompozytów wybrano próbkę zawierającą pięć warstw Ti/St (próbka nr 3) i próbkę składającą się z dziewięciu warstw Ti/Al (próbka nr 4).



Rys. 3. Wykresy rozkładów mikrotwardości w przekrojach poprzecznych badanych kompozytów: próbka 3 – kompozyt Ti/St, próbka 4 – kompozyt Ti/Al

3.1. Rozkłady mikrotwardości po zgrzewaniu wybuchowym

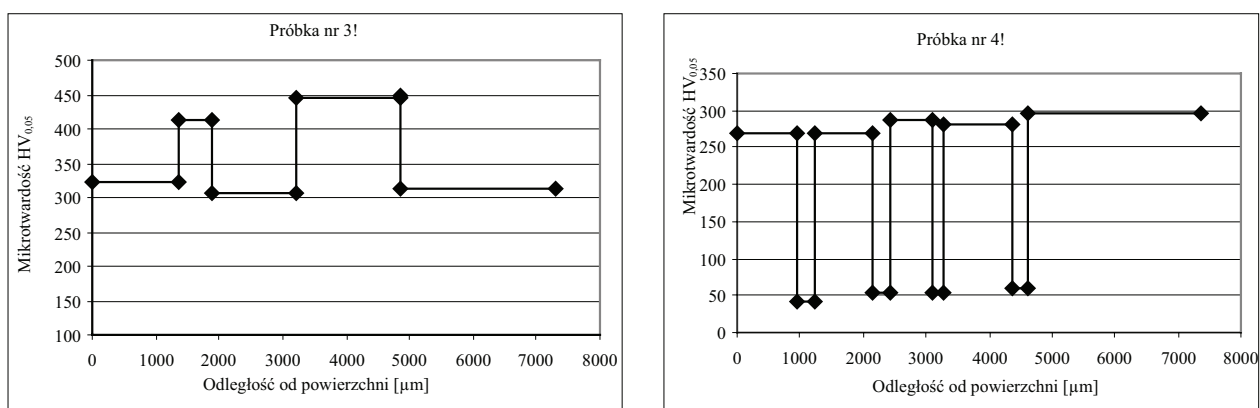
Zgrzewanie wybuchowe poszczególnych warstw kompozytów było wykonywane za pomocą warstwowych ładunków amonalu lub zawieszinowego MW. Oba MW można zaliczyć do niezbyt silnych MW. Nie zawierały wybuchowych składników, lecz były uczulane płatkowanym pyłem glinowym. Ich prędkość detonacji nie przekraczała 3 km s^{-1} , a gęstość nasypowa lub spulchnionego żeluz wynosiła około 1 g cm^{-3} .

Wyniki przeprowadzonych pomiarów ilustruje rys. 3, na którym warto zwrócić uwagę na wzrost mikrotwardości warstw tytanowych próbki 3, w miarę zgrzewania kolejnych warstw. Twardość wyjściowa płytek tytanowych wynosiła około $200 \text{ HV}_{0,05}$, a na wykresie widać, że po nałożeniu kolejnych warstw mikrotwardość spodniej warstwy tytanu wzrosła do wartości $260 \text{ HV}_{0,05}$, a środkowej do wartości około $220 \text{ HV}_{0,05}$. Nie obserwuje się istotnego wzrostu mikrotwardości pozostałych płytek stalowych.

3.2. Rozkłady mikrotwardości po umacnianiu wybuchowym

Wybuchowe umacnianie realizowano wstępnie według wariantu 1 i 4 (rys. 2), a po stwierdzeniu że skuteczniejszy jest wariant 4, ograniczono się do stosowania tego wariantu. Prędkość detonacji stosowanego PMW wynosiła $7,5 \text{ km s}^{-1}$, jego gęstość $1,4 \text{ g cm}^{-3}$, a grubość warstwy $2,5 \text{ mm}$. Aby wyróżnić próbki umacniane wybuchowo oznaczono je dodatkowo symbolem (!). Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 4.

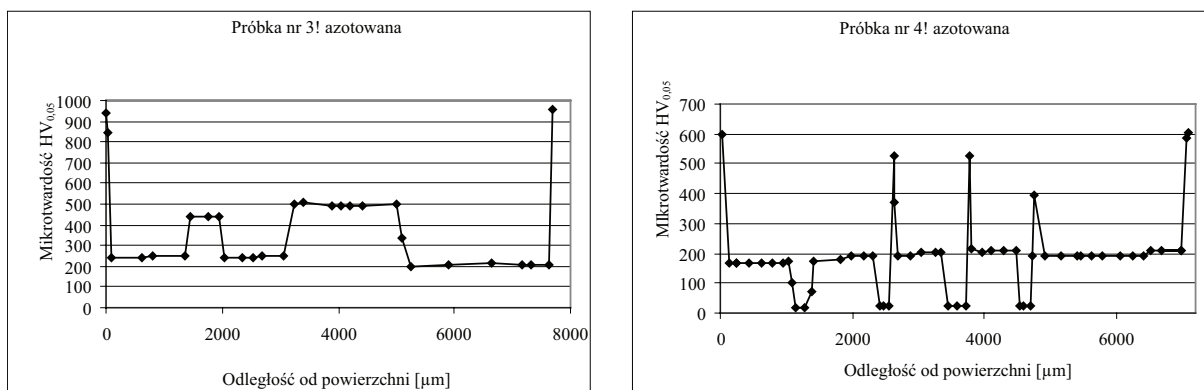
W obu kompozytach wyraźnie widać wzrost mikrotwardości w porównaniu z rozkładami na rys. 3. Największy przyrost osiągnięto w przypadku wierzchniej płytki tytanowej z kompozytu Ti/St, co jest zrozumiałe, ponieważ na nią działał największy impuls ciśnienia. Początkowa wartość mikrotwardości wynosiła $180 \text{ HV}_{0,05}$, a po umocnieniu $320 \text{ HV}_{0,05}$. Wzrosła również mikrotwardość płytek stalowych: z poziomu $340 \text{ HV}_{0,05}$ do wartości $(415 \div 450) \text{ HV}_{0,05}$. W kompozycie Ti/Al zaobserwowano także wzrost mikrotwardości po wybuchowym umocnieniu, ale mniejszy niż w omawianym poprzednio przykładzie. Mikrotwardość tytanu wzrosła z poziomu $(230 \div 250) \text{ HV}_{0,05}$ do wartości $(270 \div 295) \text{ HV}_{0,05}$. Mikrotwardość aluminium praktycznie nie zmieniła się.



Rys. 4. Wykresy rozkładów mikrotwardości w przekrojach próbek poddanych wybuchowemu umacnianiu: próbka 3! – kompozyt Ti/St, próbka 4! – kompozyt Ti/Al

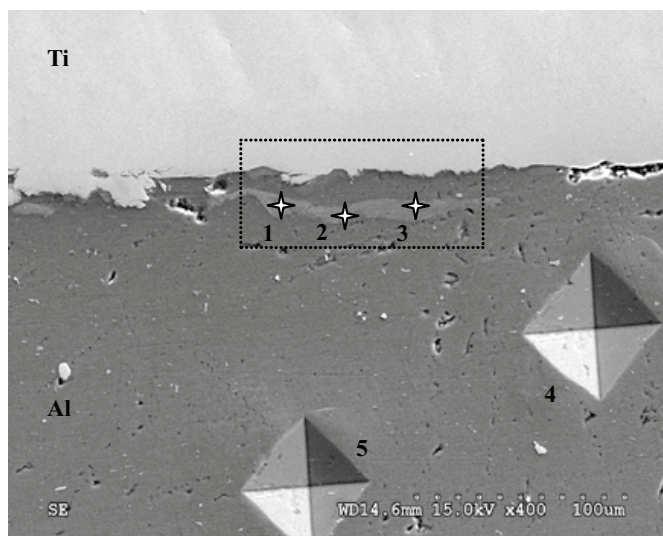
3.3. Rozkłady mikrotwardości po jarzeniowym azotowaniu

Azotowanie jarzeniowe obu rodzajów kompozytów przyniosło nieoczekiwane i zaskakujące wyniki (rys. 5). Zniknęły korzystne efekty umacniania wybuchowego płytek tytanowych i stalowych, a nawet mikrotwardość aluminium spadła poniżej stanu wyjściowego (około $50 \text{ HV}_{0,05}$). Jedyne warstwy powierzchniowe kompozytów – płytki tytanowe uzyskały znaczny wzrost mikrotwardości, ale dla kompozytu Ti/St był on wyższy (bo do poziomu $950 \text{ HV}_{0,05}$) niż w przypadku kompozytu Ti/Al, który osiągnął wzrost tylko do wartości $600 \text{ HV}_{0,05}$. Różnice te prawdopodobnie wynikają z różnych stopni zdefektowania struktury tych kompozytów po wybuchowym umacnianiu. Charakterystyczne wzrosty mikrotwardości kompozytu Ti/Al na granicy złącza tych płytek, wewnątrz kompozytu, świadczą o powstawaniu tam fazy międzymetalicznej.



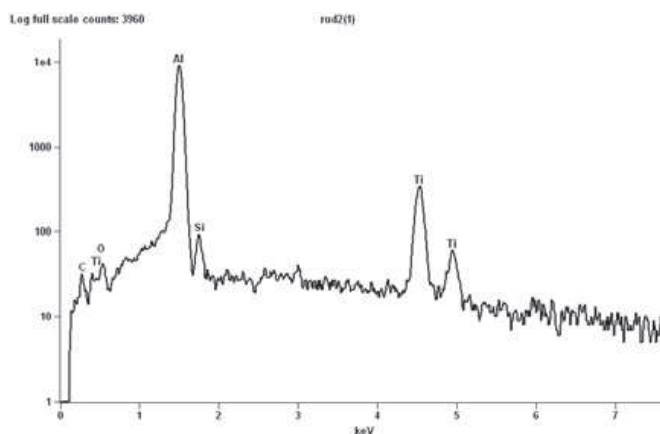
Rys. 5. Wykresy rozkładów mikrotwardości w przekrojach kompozytów po umacnianiu wybuchowym i jarzeniowym azotowaniu: próbka 3! – kompozyt Ti/St, próbka 4! – kompozyt Ti/Al

Aby potwierdzić obecność fazy międzymetalicznej utworzonej wewnątrz kompozytu Ti/Al na granicy złącza Ti–Al wykonano zdjęcie przy użyciu mikroskopu scanningowego z przystawką EDS, pozwalającą na analizę elementarną składu chemicznego występującej fazy międzymetalicznej. Na rys. 6 zaznaczono obszar występowania tej fazy linią kropkowaną.



Rys. 6. Strefa złącza kompozytu Ti/Al po azotowaniu: 1, 2, 3) punkty pomiaru sondą EDS; 4, 5) odciski aparatu Vickersa

Wykres na rys. 7 i tabela 1 ilustrują wyniki analizy elementarnej punktu 1 z rys. 6. Potwierdzają one obecność atomów Ti wewnątrz fazy Al, co wskazuje na możliwość występowania w tym miejscu fazy międzymetalicznej Ti/Al. Wskazuje na to również mikrotwardość zmierzona w punktach 1, 2 i 3, która wynosi odpowiednio: (525, 510, 517) HV_{0,05}.



Rys. 7. Analiza elementarna w punkcie 1 strefy złącza Ti/Al

Tab. 1. Zestawienie wyników analizy elementarnej punktu 1 strefy złącza Ti/Al

Wyniki ilościowe dla: rud2(1)				
Linia pierwiastka	Udział masowy [%]	Błąd udziału masowego [%]	Udział atomowy [%]	Błąd udziału atomowego [%]
O K	1,34	± 0,23	2,39	± 0,40
Al K	83,51	± 0,40	88,21	± 0,42
Si K	0,91	± 0,14	0,92	± 0,14
Ti K	14,24	±0,34	8,47	± 0,21
Razem	100,00	---	100,00	---

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wybuchowe umacnianie wielowarstwowych kompozytów poprawia ich twardość nie tylko na powierzchni, ale skutki wybuchowego obciążenia widoczne są w całym przekroju kompozytu. Przyrosty twardości nie są duże i wynoszą około $(20 \div 30)\%$.

Jarzeniowe azotowanie powoduje znaczny wzrost twardości na powierzchniach i cofnięcie efektu umocnienia wewnątrz kompozytu. Powstawanie fazy międzymetalicznej na granicy złącza Ti-Al jest skutkiem głównie długotrwałego oddziaływania temperatury i silnego zdefektowania tego obszaru podczas zgrzewania wybuchowego.

Podziękowanie

Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych na naukę w latach 2008 ÷ 2011 jako projekt badawczy nr O N507 014634.

Literatura

- [1] Nowaczewski J., Bozik B., Pluta R., Rudnicki J., *Zgrzewanie wybuchowe płytek metalowych w celu uzyskania wielowarstwowych kompozytów*. w pracy zbiorowej red. Maranda A., Sałaciński T., Lewandowska A., „Materiały Wysokoenergetyczne”, Tom 2, str. 43-48, Wyd. IPO, Warszawa 2010.
- [2] Dyja H., Maranda A., Nowaczewski J., *Amonale tanie i bezpieczne materiały wybuchowe w wysokoenergetycznej obróbce metali*, Inż. Mat. nr 5 (130), IX-X 2002, s. 589-592.
- [3] Maranda A., Nowaczewski J., Zygmunt B., *Adaptacja zawieszinowych materiałów wybuchowych do wybuchowego zgrzewania blach*, Biul. WAT 31, 1982, 2.
- [4] Bojar Z., Przetakiewicz W., *Materiały metalowe z udziałem faz międzymetalicznych*, Wyd. Bellona, Warszawa 2006.
- [5] Szkliniarz W., *Stopy na osnowie faz międzymetalicznych z układu Ti-Al*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.