



## Zastosowanie zgrzewania tarcowego wolframowego stopu ciężkiego ze stopem aluminium w konstrukcji specjalnej\*

Olgierd GOROCH<sup>1</sup>, Mieczysław KACZOROWSKI<sup>1</sup>, Adam PIETRAS<sup>2</sup>,  
Paweł SKOCZYŁAS<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Instytut Mechaniki i Poligrafii,  
Politechnika Warszawska, ul. Narbutta 85, 05-524 Warszawa*  
<sup>2</sup>*Instytut Spawalnictwa, ul. Błogostawionego Czesława 16-18, 44-100 Gliwice*

**Streszczenie.** Przedmiotem pracy są wyniki badań procesu zgrzewania tarcowego wolframowego stopu ciężkiego WHA (ang. Weight Heavy Alloy) ze stopem aluminium AlMg3. Stwierdzono, że zgrzewanie tarcowe wolframowego stopu ciężkiego o gęstości  $17,5 \text{ Mg/m}^3$  ze stopem Al zapewnia uzyskanie wytrzymałości złącza przewyższającej granicę plastyczności obrobionego plastycznie stopu AlMg3. Wytrzymałość złącza wydaje się obiecująca z punktu widzenia wymagań, jakie muszą być spełnione w wypadku amunicji podkalibrowej, gdzie pręty z WHA pełnią funkcję penetratorów kinetycznych i w których stop aluminium stanowi czepiec balistyczny.

**Słowa kluczowe:** zgrzewanie tarcowe, wolframowe stopy ciężkie, amunicja, pocisk

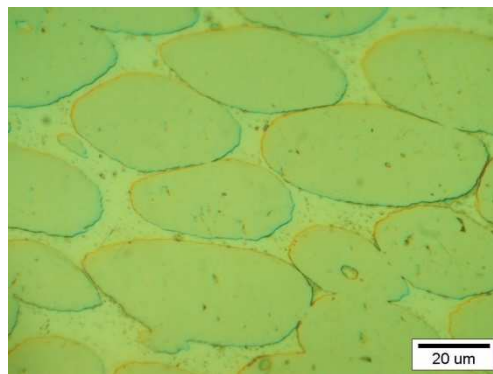
### 1. WSTĘP

Stopy ciężkie, obok wielu innych zastosowań, są wykorzystywane między innymi na rdzenie pocisków podkalibrowych [1]. Ze względu na coraz częściej podnoszoną sprawę toksyczności zubożonego uranu – DU (ang. Depleted Uranium), który od dawna stosuje się na rdzenie pocisków podkalibrowych, jest on sukcesywnie zastępowany przez stopy wolframu.

\* Artykuł został opracowany na podstawie referatu prezentowanego podczas IX Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”, Pułtusk, 25-28 września 2012 r.

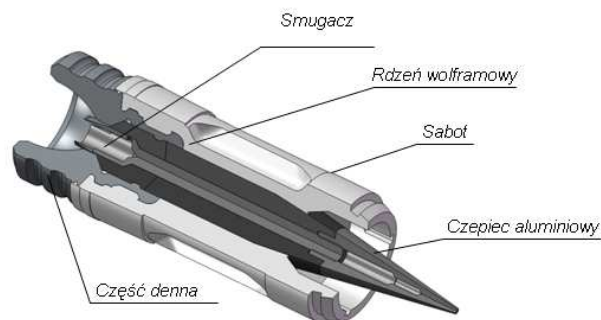
Wybór wolframu jako zamiennika DU wynika z ich porównywalnych gęstości, ale na tym kończy się ich podobieństwo, ponieważ znacznie różnią się właściwościami mechanicznymi i fizycznymi, a co najważniejsze – temperaturą topnienia.

Bardzo wysoka temperatura topnienia wolframu, wynosząca 3420°C powoduje, że wolframowe stopy ciężkie wytwarza się zwykle metodą spiekania z udziałem fazy ciekłej – LPS (ang. Liquid Phase Sintering). Skutkuje to specyficzną mikrostrukturą tych stopów (rys. 1), które z tego właśnie powodu często określa się mianem kompozytów wolframowych. By zapobiec zjawisku rykoszetowania, rdzenie pocisków podkalibrowych są zaopatrywane w czepce balistyczne (rys. 2) wykonane ze stopu Al. Jak dotąd połączenie WHA – stop aluminium jest połączeniem gwintowym, co znacząco wydłuża nie tylko proces wytwarzania, ale również czyni go bardziej kosztownym głównie ze względu na konieczność obróbki skrawaniem wyjątkowo niedogodnego stopu wolframu.



Rys. 1. Mikrostruktura wolframowego stopu ciężkiego

Fig. 1. Microstructure of tungsten heavy alloy



Rys. 2. Schemat budowy pocisku APDS

Fig. 2. Schematic diagram of APDS projectile

Zgrzewanie tarcowe nie jest technologią nową, ponieważ liczy ponad 100 lat. Można byłoby zatem oczekiwać, że problem łączenia nie istnieje w ogóle i rzeczywiście jest tak w wypadku materiałów konwencjonalnych, zwłaszcza gdy chodzi o łączenie materiałów podobnych. Zupełnie inaczej przedstawia się zagadnienie łączenia WHA ze stopem aluminium. Różnią się one właściwościami mechanicznymi, temperaturą topnienia, współczynnikami rozszerzalności liniowej cieplnej itd. Trudności w łączeniu materiałów nazywanych często „różniamiennymi” podnosił Ambroziak i inni [2-5] i dlatego problem otrzymania złącza WHA – stop Al nie wydawał się wcale łatwy. Wstępne próby wykonania połączeń WHA – stop Al metodą zgrzewania tarcowego wykazały, że jest ona perspektywiczna, ponieważ umożliwia uzyskanie połączeń o wytrzymałości na rozrywanie na poziomie bliskim wytrzymałości stopu aluminium [6].

## 2. MATERIAŁ DO BADAŃ I METODY BADAŃ

Do wykonania złączy wykorzystano: wolframowy stop ciężki otrzymany w laboratorium stopów ciężkich Politechniki Warszawskiej metodą metalurgii proszków o gęstości  $17,5 \text{ Mg/m}^3$  oraz stop AlMg3 (PN-EN 573-3:2009) w postaci pręta. Szczegóły procesu wytwarzania stopu wolframu podano w pracy [6]. Zgrzewanie przeprowadzono na zgrzewarce tarcowej w Instytucie Spawalnictwa w Gliwicach przy zastosowaniu zmiennej wartości siły docisku tarcia oraz czasu tarcia, utrzymując stałą wartość siły spęczania oraz czasu spęczania wynoszące odpowiednio:  $F_S = 50 \text{ kN}$  i  $t_S = 5 \text{ s}$  (tabela 1).

Próbki do zgrzewania zostały przygotowane w postaci prętów o średnicy 20 mm i długości ok. 100 mm. Łącznie wykonano 32 pary złączy WHA – AlMg3 dla zmiennych parametrów zgrzewania wg planu dwupoziomowego teorii planowania eksperymentu [7]. Po wykonaniu połączenia próbki chłodzono w powietrzu. Otrzymane złącza poddano badaniom na maszynie wytrzymałościowej w celu wyznaczenia przede wszystkim wytrzymałości na rozrywanie oraz obserwacjom mikroskopowym powierzchni przełomów po stronie WHA i Al.

Badania na maszynie wytrzymałościowej przeprowadzono na próbkach dwojakiego rodzaju. Pierwszymi były minipróbki wytoczone z fragmentów otrzymanych po przecięciu zgrzanych prętów wzdłuż ich osi na cztery ćwiartki, zaś drugimi próbki pełnowymiarowe, których część chwykowa miała średnicę ok. 20 mm oraz odpowiednio mniejszą w części złącza. Ponadto wykonano badania rozkładu twardości w funkcji odległości od płaszczyzny złącza.

Tabela 1. Zestawienie parametrów procesu zgrzewania tarcowego

Table 1. The parameters of friction welding process

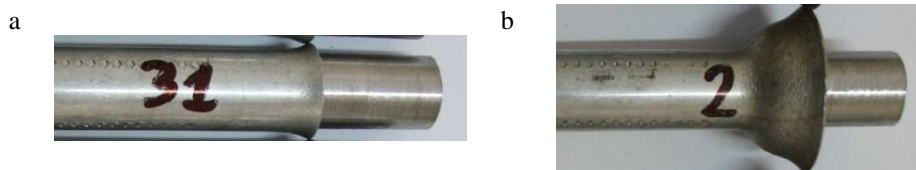
Nr próbki	Czas tarcia	Siła w okresie tarcia	Nr próbki	Czas tarcia	Siła w okresie tarcia
	$t_t$ [s]	$F_t$ [kN]		$t_t$ [s]	$F_t$ [kN]
1	7	10,0	17	4,5	12,5
2	10	20,0	18	7,5	22,5
3	7	20,0	19	4,5	22,5
4	10	10,0	20	7,5	12,5
5	3,5	20,0	21	4,5	12,5
6	6,5	30,0	22	7,5	22,5
7	3,5	30,0	23	4,5	22,5
8	6,5	20,0	24	7,5	12,5
9	6,5	12,5	25	4,5	15,0
10	9,5	22,5	26	7,5	25,0
11	6,5	22,5	27	4,5	25,0
12	9,5	12,5	28	7,5	15,0
13	4,5	12,5	29	0,5	12,5
14	7,5	22,5	30	3,5	22,5
15	4,5	22,5	31	0,5	22,5
16	7,5	12,5	32	3,5	12,5

Badania mikroskopowe objęły obserwacje metalograficzne oraz badania fraktograficzne powierzchni przełomów po rozerwaniu próbek na maszynie wytrzymałościowej. Na tym etapie zostały one ograniczone do połączeń o maksymalnej i minimalnej wytrzymałości na rozrywanie. Obserwacje przełomów przeprowadzono w skali makroskopowej na mikroskopie stereoskopowym Olympus X-9, zaś w skali mikroskopowej w skaningowym mikroskopie elektronowym – SEM (ang. Scanning Electron Microscope).

### 3. WYNIKI BADAŃ

Na rysunku 3 pokazano przykłady połączeń próbek WHA – AlMg3 otrzymanych metodą zgrzewania tarcowego, przy zastosowaniu zmiennych parametrów procesu.

Złącza charakteryzują się wypływką w kształcie stożka lub kielicha o wielkości zależnej od parametrów zgrzewania tarcowego. Kształt wypływkę wynikał także z różnoimienności łączonych materiałów. Wypływkę były usuwane na tokarce przed badaniami wytrzymałościowymi na rozrywanie.



Rys. 3. Przykład złączy WHA – AlMg3 po zgrzewaniu tarcowym przy parametrach:  
a –  $F_S = 22,5$  kN i  $t_S = 0,5$  s oraz b –  $F_S = 20$  kN i  $t_S = 10$  s

Fig. 3. The examples of friction welded WHA-AlMg3 joints obtained for:  
a –  $F_S = 22,5$  kN and  $t_S = 0,5$ s, b –  $F_S = 20$  kN and  $t_S = 10$ s

### 3.1. Wyniki badań własności wytrzymałościowych

#### 3.1.1. Badania na maszynie wytrzymałościowej

Wyniki badań wytrzymałości na rozrywanie podano w tabelach, przy czym w pierwszej z nich (tabela 2) zamieszczono wyniki otrzymane dla minipróbek, zaś w drugiej (tabela 3) dla próbek pełnowymiarowych. W tym miejscu należy zaznaczyć, że znaczna różnica w wartości siły rozrywającej  $F_{max}$  (kolumna 3) dla minipróbek i próbek pełnowymiarowych wynika ze znacznie mniejszego przekroju tych pierwszych w porównaniu z przekrojem próbek pełnowymiarowych.

Z porównania wartości zamieszczonych w tabelach 2 i 3 wynika, że rezultaty uzyskane dla minipróbek są wyraźnie lepsze niż dla próbek pełnowymiarowych. Z tabeli 2 wynika również, iż w wypadku trzech połączeń uzyskano wartości naprężenia rozrywającego powyżej 200 MPa – wartość ta jest większa niż umowna granica plastyczności dla stopu AlMg3 w stanie umocnionym. Warto też zauważyć, że rozrzut wyników badań wytrzymałości na rozrywanie, w większości wypadków, nie jest duży (tabela 2).

Tabela 2. Wyniki badań wytrzymałości na rozrywanie wybranych minipróbek

Table 2. The results of tensile strength experiment on selected of mini samples

Numer próbki	Parametry zgrzewania		Siła rozrywająca	Napężenie rozrywające	Wartość średnia napężenia rozrywającego
	$t_T$ [s]	$F_T$ [kN]	$F_{max}$ [kN]	$\sigma_r$ [MPa]	$\sigma_r^{sr}$ [MPa]
1a	7,0	10	4,49	144,04	146,6
1b			4,68	149,18	
3a	7,0	20	5,03	177,01	163,6
3b			4,78	150,22	
4a	10,00	1,00	5,18	195,38	<b>202,6</b>
4b			6,00	209,75	
5a	3,50	20,0	5,44	190,49	192,4
5b			5,27	194,40	
6a	6,50	30,0	4,20	158,15	141,0
6b			2,00	123,82	
7a	3,50	30,0	4,15	162,92	166,6
7b			4,27	170,31	
8a	6,50	20,0	4,13	192,61	175,6
8b			4,35	158,57	
10a	9,50	22,5	4,24	140,21	138,5
10b			3,76	136,83	
11a	6,50	22,5	3,78	137,10	135,0
11b			3,60	132,80	
12a	9,50	12,5	6,71	228,48	<b>231,5</b>
12b			7,15	234,55	
14a	7,50	22,5	3,63	138,34	131,5
14b			3,64	124,76	
15a	4,50	22,5	3,35	147,09	145,8
15b			4,33	144,59	
20a	7,50	12,5	4,53	175,06	175,0
20b			4,52	174,98	
25a	4,50	15,0	4,34	156,88	155,0
25b			4,55	153,17	
26a	7,50	25,0	3,42	131,25	134,1
26b			3,95	136,95	
29a	0,50	12,5	2,87	98,53	97,0
29b			2,81	95,52	
30a	3,50	22,5	4,59	171,65	172,5
30b			4,17	173,30	
32a	3,50	12,5	6,52	230,98	<b>234,3</b>
32b			6,81	237,67	

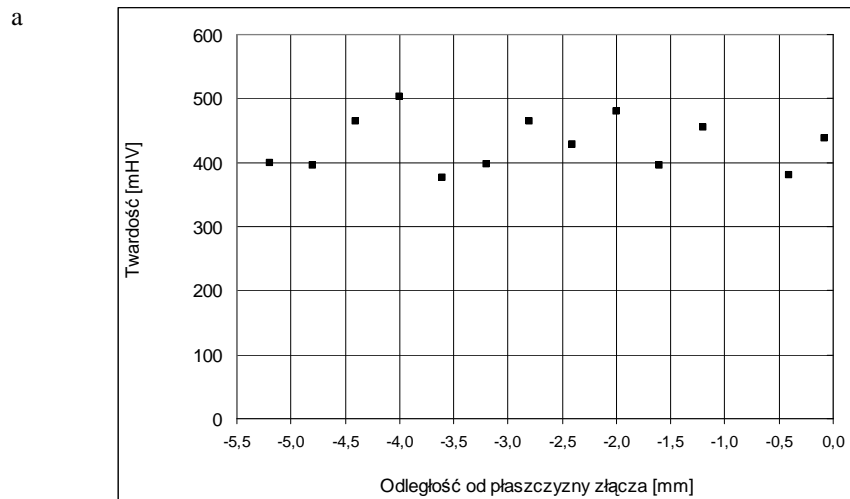
Tabela 3. Wyniki badań wytrzymałości na rozrywanie próbek pełnowymiarowych

Table 3. The results of tensile strength experiment on full-size samples

Numer próbki	Parametry zgrzewania		Siła rozrywająca	Naprężenie rozrywające
	czas tarcia [s]	siła docisku [kN]	$F_{\max}$ [kN]	$\sigma_r$ [MPa]
16	7,50	12,5	42,80	192,28
17	4,50	12,5	25,80	108,44
18	7,50	22,5	47,65	195,86
19	4,50	22,5	40,50	174,61
21	4,50	12,5	37,60	150,42
23	4,50	22,5	31,25	136,79
24	7,50	12,5	32,95	145,77

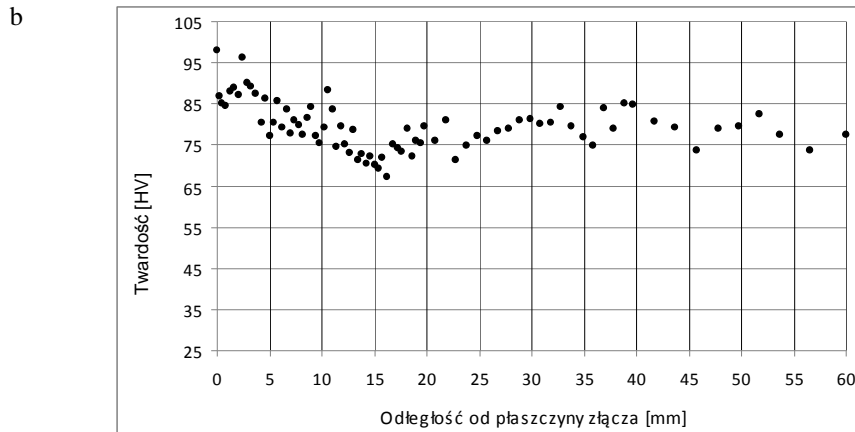
### 3.1.2. Wyniki pomiarów twardości

Badania twardości przeprowadzono metodą Vickersa przy zastosowaniu obciążenia  $F = 1$  N. Na rysunku 4 zamieszczono przykład wykresu ilustrującego zmianę twardości w funkcji odległości od płaszczyzny zgrzewania dla części wykonanej z WHA oraz ze stopu aluminium.



Rys. 4. Przykład zmian twardości WHA – AlMg3 po zgrzewaniu tarcowym w funkcji odległości od płaszczyzny złącza: a – w stopie WHA

Fig. 4. The example of microhardness variation in friction welded WHA – AlMg3 specimen as a function of distance from joint plane: a – in WHA



Rys. 4. Przykład zmian twardości WHA – AlMg3 po zgrzewaniu tarciovym w funkcji odległości od płaszczyzny złącza: b – w stopie AlMg3

Fig. 4. The example of microhardness variation in friction welded WHA – AlMg3 specimen as a function of distance from joint plane: b – in AlMg3 alloy

Z wykresu zamieszczonego na rysunku 4a wynika, iż zgrzewanie tarciove nie wpływa na przebieg zmian twardości w stopie WHA, a obserwowane „fluktuacje” są nieodłączną cechą badań mikrotwardości. W przeciwieństwie do wykresu dla WHA, przebieg zmian twardości dla stopu AlMg3 (rys. 4b) wykazuje wyraźny wpływ procesu zgrzewania na rozkład twardości w funkcji odległości od płaszczyzny złącza.

Po pierwsze widać umocnienie warstwy w pobliżu złącza, za którą w zakresie 10-20 mm obserwuje się niewielkie, ale jednak wyraźne zmniejszenie twardości. Dopiero w odległości powyżej 30 mm od płaszczyzny złącza twardość ustala się na poziomie około 80 HV 0,1.

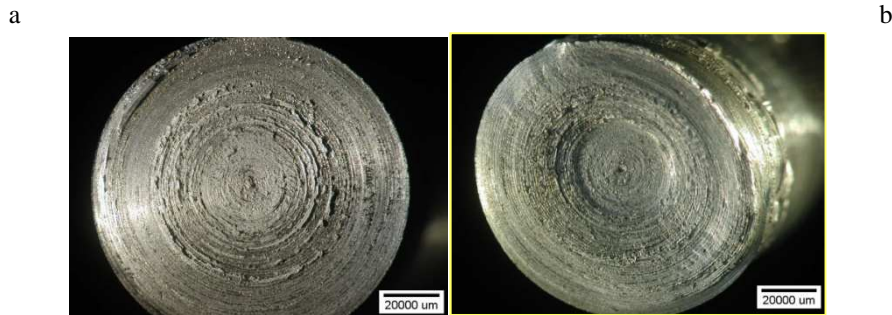
## 3.2. Wyniki badań mikroskopowych

### 3.2.1. Obserwacje mikroskopowe

Na rysunku 5 zamieszczono przykład powierzchni zniszczenia złącza od strony WHA (rys. 5a) oraz od strony stopu aluminium Al (rys. 5b) po rozerwaniu na maszynie wytrzymałościowej. Na obu mikrografiach widać wyraźne współosiowe pierścienie będące skutkiem wzajemnego ruchu obrotowego łączonych próbek. Mikronierówności na powierzchni obu próbek wskazują na zacieranie się współpracujących powierzchni podczas zgrzewania tarciovego. Bardziej szczegółowe obserwacje wykazały obecność stopu aluminium na powierzchni próbki ze stopu WHA.



Powyższe może sugerować, iż zniszczenie podczas rozciągania było inicjowane i przebiegało po stronie stopu AlMg<sub>3</sub>.

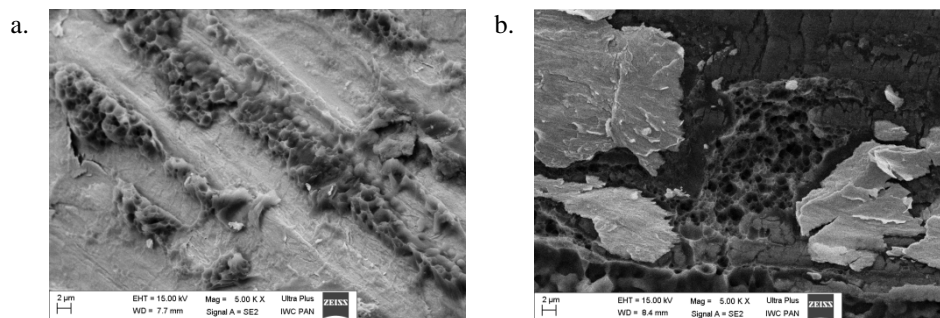


Rys. 5. Przykład morfologii powierzchni złącza po rozerwaniu na maszynie wytrzymałościowej: a – powierzchnia WHA i b – powierzchnia stopu AlMg<sub>3</sub>

Fig. 5. The example of morphology of specimen broken in tensile test:  
a – WHA surface and b – AlMg<sub>3</sub> alloy surface

### 3.2.2. Obserwacje faktograficzne w SEM

Na rysunku 6 zamieszczono przykłady powierzchni przełomów próbek po badaniach na maszynie wytrzymałościowej, otrzymane podczas obserwacji w SEM. Morfologia powierzchni przełomu ma charakter mieszany z przewagą ciągliwego, czego dowodem są tzw. kratery widoczne zarówno na powierzchni próbki ze stopu AlMg<sub>3</sub> (rys. 6a), jak i próbki WHA (rys. 6b) [8, 9].



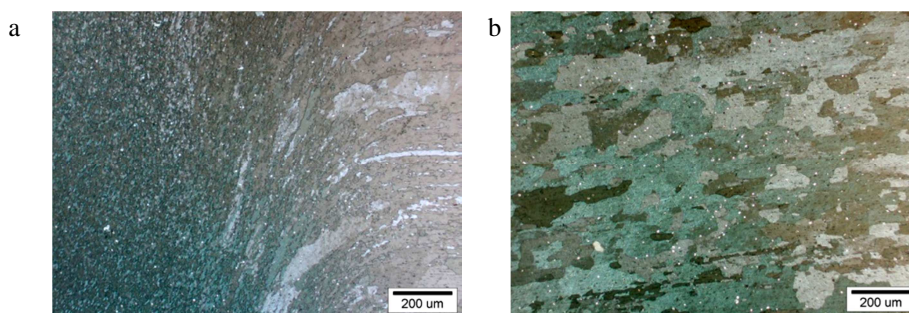
Rys. 6. Przykład powierzchni przełomu złącza WHA – AlMg<sub>3</sub> obserwowanej w SEM:  
a – powierzchnia stopu AlMg<sub>3</sub> i b – powierzchnia WHA

Fig. 6. The example of morphology of specimen broken in tensile test observed in SEM: a – AlMg<sub>3</sub> alloy surface and b – WHA surface

Na rysunku 6b można zauważyć oznaki pęknięć kruchych – transkrystalicznych – wzdłuż płaszczyzn łupliwości ziaren wolframu, widocznych w postaci jasnych powierzchni z charakterystycznymi liniami tzw. „dorzeczy”. Obie mikrografie elektronowe sugerują, iż – w przeciwieństwie do sugestii w poprzednim podrozdziale – zniszczenie połączenia podczas rozciągania nie przebiegało tylko w stopie AlMg3, ale w płaszczyźnie złącza i w procesie pęknięcia uczestniczyły zarówno fragmenty stopu aluminium, jak i ziarna wolframu.

### 3.2.3. Obserwacje metalograficzne

Na rysunku 7 pokazano przykład mikrostruktury stopu AlMg3 w pobliżu złącza po procesie zgrzewania tarcowego. Na rysunku 7a widoczny jest charakterystyczny rozkład płynięcia materiału w bezpośrednim sąsiedztwie płaszczyzny zgrzewania z silnie rozdrobnionymi ziarnami. Mikrostruktura stopu w nieco większej odległości ujawnia obecność ziaren o znacznie większych wymiarach (rys. 7b).



Rys. 7. Mikrostruktura stopu AlMg3 po zgrzewaniu: a – bezpośrednio w pobliżu płaszczyzny zgrzewania, b – w nieco większej odległości od powierzchni zgrzewania

Fig. 7. The microstructure of AlMg3 alloy after friction welding: a – very close to the joining plane and b – at some distance from the joining plane

## 4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Na wstępie autorzy chcieliby zaznaczyć, że zamieszczone w pracy wyniki są relacją z niezakończonych jeszcze prób zmierzających do weryfikacji tezy o możliwości zastąpienia dotychczasowej metody łączenia czepców balistycznych ze stopu aluminium z rdzeniem WHA metodą zgrzewania tarcowego.

Jeśli rozważyć przebieg procesu zgrzewania tarcowego, to łatwo zauważyć, że łączenie materiałów o tak różnych własnościach mechanicznych w największym stopniu oddziałuje na element o znacznie mniejszej wytrzymałości, w tym wypadku stop aluminium.

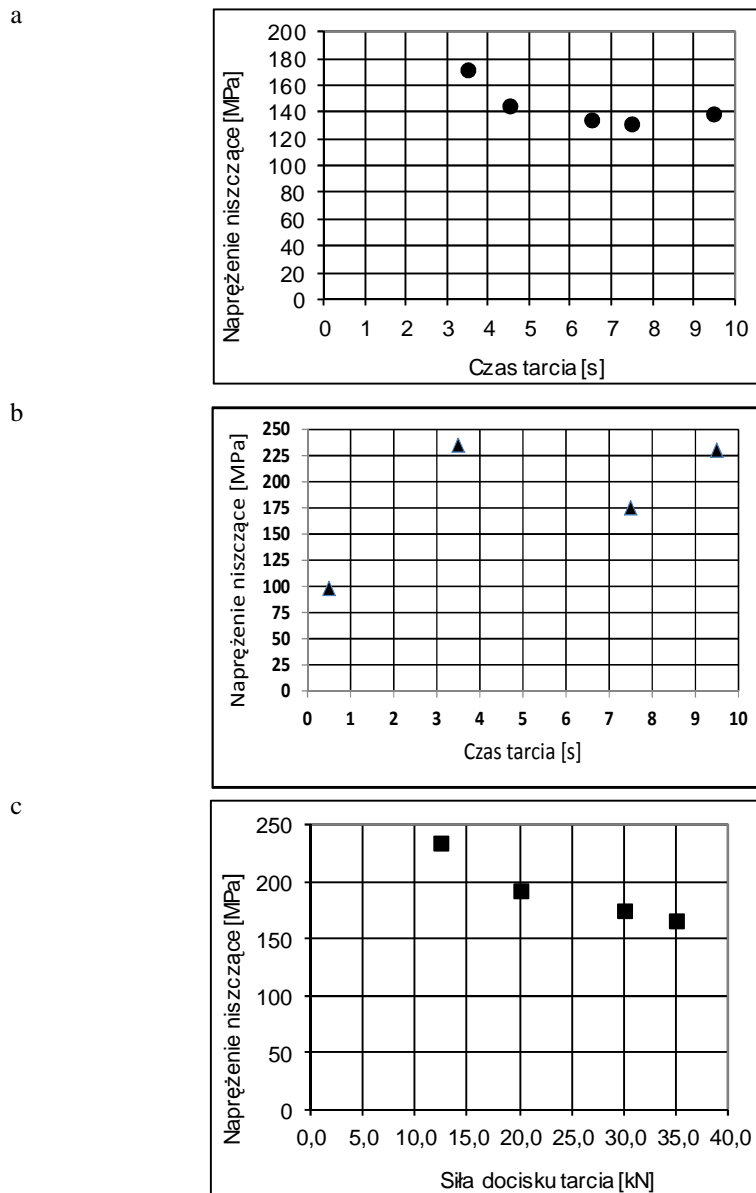
Rysunek 3 pokazuje, iż pręt wykonany z WHA wciska się w pręt ze stopu aluminium, powodując jego znaczne skrócenie. Tak duże skrócenie próbki nie jest korzystne. Wielkość skrócenia zależy od parametrów procesów zgrzewania tarcowego, zwłaszcza siły docisku w okresie tarcia oraz od czasu tarcia. Wynika to z faktu, że temperatura bezpośrednio w obszarze złącza jest niewiele niższa od temperatury topnienia stopu AlMg3, co skutkuje znacznym zmniejszeniem właściwości wytrzymałościowych umożliwiających bardzo intensywne odkształcenia plastyczne. Ta temperatura, wysoka w odniesieniu do stopu AlMg3, stanowiąca tylko niewielki ułamek bezwzględnej temperatury topnienia wolframu, jest wystarczająca do tego, by doprowadzić do uplastycznienia ziaren wolframu w płaszczyźnie złącza.

Jakkolwiek nie zamieszczono zdjęć ilustrujących ten fakt, to jednak odkształcenie plastyczne ziaren wolframu wielokrotnie obserwowano w płaszczyźnie połączenia, mimo że czas zgrzewania nie przekraczał 10 sekund. Najbardziej interesujące z punktu widzenia właściwości użytkowych złącza WHA – AlMg3 są jednak zmiany w stopie Al.

Podczas zgrzewania tarcowego stop aluminium podlega specyficznej obróbce cieplno-plastycznej, w wyniku której przebiegają w nim przemiany prowadzące do zmian mikrostruktury, a co za tym idzie właściwości mechanicznych. Zmiany, które można przewidywać to:

- możliwość powstania wąskiej strefy dyfuzyjnej po obu stronach płaszczyzny złącza, tj. w aluminium oraz osnowie na bazie stopu niklu w WHA,
- możliwość wydzielenia faz międzymetalicznych, np. fazy  $\beta$  –  $\text{Al}_8\text{Mg}_5$  lub  $\text{NiAl}_3$ ,
- bardzo silne odkształcenie plastyczne, którego skutki mogą być i są zapewne usuwane wskutek oddziaływania wysokiej temperatury, czyli procesów zdrowienia i rekrytalizacji.

Nie wdając się na tym etapie w szczegółową analizę zjawisk dokonujących się podczas zgrzewania tarcowego, autorzy skoncentrowali się na zależności między parametrami zgrzewania a wytrzymałością złącza na rozerwanie.



Rys. 8. Zależność napężenia niszczącego od: a – czasu tarcia dla stałej wartości  $F_T = 22,5$  kN, b – czasu tarcia dla stałej wartości siły docisku tarcia  $F_T = 12,5$  kN i c – siły docisku tarcia dla stałej wartości czasu tarcia  $t_T = 3,5$  s

Fig. 8. The dependence of failure stress on: a – friction time at constant  $F_T = 22,5$  kN, b – friction time at constant  $F_T = 12,5$  kN, c – friction force at constant  $t_T = 3,5$ s

Dysponując wynikami badań zestawionymi w tabeli 2, sporządzono wykresy zależności wytrzymałości na rozrywanie (naprężenia niszczącego) od siły docisku  $F_T$  dla ustalonego czasu tarcia oraz od czasu tarcia  $t_T$  dla ustalonej wartości siły docisku, wykresy te zamieszczono na rysunku 8. Z pierwszego z nich (rys. 8a) wynika, że dla stałej siły docisku  $F_T = 22,5$  kN zwiększanie czasu tarcia prowadzi do zmniejszenia wartości naprężenia niszczącego. Z kolei w przypadku dwukrotnego zmniejszenia siły docisku do wartości  $F_T = 12,5$  kN naprężenie niszczące wykazuje tendencję do zwiększania wytrzymałości połączenia w badanym zakresie czasów tarcia (rys. 8b). W tym przypadku charakter zależności nie jest tak jednoznaczny jak na rysunku 8a.

Z wykresu zamieszczonego na rysunku 8c wynika, że dla stałego czasu tarcia wynoszącego  $t_T = 3,5$  sekundy, wzrost siły docisku powoduje zmniejszenie wartości naprężenia niszczącego.

Z powyższych rozważań wynika, że wytrzymałość złącza WHA – AlMg3 zależy zarówno od siły docisku w okresie tarcia  $F_T$ , jak i czasu tarcia  $t_T$ . Na podstawie analizy zamieszczonych wykresów należy przypuszczać, że największą wytrzymałość złącza można uzyskać dla siły docisku znajdującej się w zakresie pomiędzy 12,5 a 22,5 kN przy zastosowaniu czasu tarcia rzędu 3,5-5 sekund. Wytrzymałość złącza zależy bowiem od złożonych zjawisk, które są funkcją zarówno czasu, jak i temperatury.

Zjawiska te są związane zarówno z dyfuzją, jak i zależnymi od niej procesami wydzielania, a także odbudowy mikrostruktury po silnym zgnioście. Zbytne przegrzanie materiału, które może być skutkiem bardzo dużej siły docisku podczas tarcia albo długiego okresu tarcia, będzie sprzyjać procesom wydzielania kruchych faz międzymetalicznych. Wydzielenia te powstają najczęściej na granicach ziaren, a tym samym osłabiają złącze. Bardzo wysoka temperatura w obszarze złącza sprzyja nie tylko odbudowie mikrostruktury po zgnioście i usuwa umocnienie odkształceniowe, ale sprzyja również rozrostowi ziaren, które nie jest korzystne.

## 5. WNIOSKI

Wyniki badań zgrzewania tarcowego wolframowego stopu ciężkiego ze stopem AlMg3 skłoniły autorów do zaproponowania następujących wniosków:

1. Istnieje możliwość łączenia wolframowych stopów ciężkich (WHA) ze stopem AlMg3 metodą zgrzewania tarcowego.
2. Proces łączenia stopu WHA ze stopem AlMg3 prowadzi do istotnych zmian mikrostruktury stopu aluminium w wyniku silnego odkształcenia plastycznego.
3. Wytrzymałość na rozrywanie złącza jest porównywalna z granicą plastyczności stopu AlMg3, po zastosowaniu dla siły docisku  $F_T = 12,5-25$  kN i czasu tarcia odpowiednio 7 i 3 s.

## LITERATURA

- [1] Kaczorowski M., Ludyński Z., Rafalski M., Badania struktury kompozytów wolframowych odkształconych z dużymi prędkościami, *Materiały VI Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej*, październik 2006, s. 481-488, Waplewo, 2006.
- [2] Ambroziak A., *Zgrzewanie tarciove metali trudnotopliwych cieczy na tle innych metod spajania*, Wyd. Pol. Wrocławskiej, Monografie, nr 20, Wrocław, 1998.
- [3] Ambroziak A., *Zgrzewanie tarciove materiałów o różnych właściwościach*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2011.
- [4] Ambroziak A., Korzeniowski M., Kustroń P., Friction welding of dissimilar metal joint with intermediate layers, *Journal of Achievements in Material and Manufacturing Engineering*, vol. 21, 2007.
- [5] Kaczorowski M., The friction welding of ductile iron (structure – properties), *Acta Met. Slovaca.*, Vol. 8, No. 4, pp. 106-111, 2002.
- [6] Kaczorowski M., Skoczylas P., Skibicki A., Badania wstępne możliwości zgrzewania tarciovego kompozytu wolframowego ze stałą, *Rudy i metale nieżelazne*, vol. 53, nr 7, s. 436-442, 2008.
- [7] Mańczak K., *Technika planowania eksperymentu*, WNT, Warszawa, 1976.
- [8] Booke G.R., Scanning Electron Microscopy. The instrument, In: *Modern Diffraction and Imaging Techniques in Materials Science*, eds. A. Amelinckx, R. Gevers, G. Remaut and J. Van Landuyt, North Holland Publ. Co. Amsterdam, London, 1969.
- [9] *Metals Handbook*, vol. 12 Fractography, 9<sup>th</sup> Edition, Metals Park, Ohio, 1978.

### **Application of Friction Welding of Weight Heavy Alloy with Wrought AlMg3 Alloy for Special Purposes**

Olgiard GOROCH, Mieczysław KACZOROWSKI, Adam PIETRAS,  
Paweł SKOCZYLAS

**Abstract.** The results of studies concerning friction welding of Weight Heavy Alloy (WHA) with AlMg3 alloy are presented. The friction welding of density 17,5 Mg/m<sup>3</sup> with aluminum alloy showed that it is possible to reach the joints with the strength exceeding the yield strength of wrought AlMg3 alloy. This strength looks to be promising from point of view of condition which have to be fulfilled in case of armor subcaliber ammunition, where WHA rods play the role Kinetic Energy Penetrators and aluminum is used for projectile ballistic cup.

**Keywords:** friction welding, weight heavy alloys, ammunition