PROBLEMY MECHATRONIKI
UZBROJENIE, LOTNICTWO, INŻYNIERIA BEZPIECZEŃSTWA

ISSN 2081-5891

6, 1 (19), 2015, 27-40

Kształtowanie struktury i właściwości wolframowych stopów ciężkich o przeznaczeniu specjalnym

Mieczysław KACZOROWSKI*, Paweł SKOCZYLAS

Zakład Mechaniki i Technik Uzbrojenia IMiP, Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa
**autor korespondencyjny, e-mail: m.kaczorowski@wip.pw.edu.pl*

Artykuł wpłynął do redakcji 24.06.2014. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 17.11.2014

DOI: 10.5604/20815891.1149754

Streszczenie. W artykule zamieszczono wyniki badań doświadczalnych, których celem było opracowanie metody wytwarzania wolframowych stopów ciężkich (WSC), przeznaczonych na rdzenie pocisków podkalibrowych stabilizowanych brzechwowo typu APFSDS (ang. *Armor Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot*). Stwierdzono, że najbardziej skuteczną metodą zwiększania właściwości wytrzymałościowych WSC jest obróbka plastyczna na zimno, prowadząca do umocnienia odkształceniowego zarówno ziaren wolframu, jak i osnowy na bazie Ni. Obróbka ta powinna być jednak prowadzona w sposób kontrolowany, ponieważ nadmierny zgniot, powodujący bardzo duże zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie i twardości, dokonuje się kosztem znaczącego zmniejszenia wydłużenia, w szczególności odporności na obciążenia udarowe. Obróbka cieplna obejmująca wyżarzanie pod obniżonym ciśnieniem oraz szybkie chłodzenie (przesycanie) połączone z późniejszym wyżarzaniem w temperaturze w zakresie 500-800°C umożliwia dalsze zwiększenie wytrzymałości WSC, lecz efekt obróbki cieplnej jest znacznie mniej efektywny niż obróbki plastycznej na zimno.

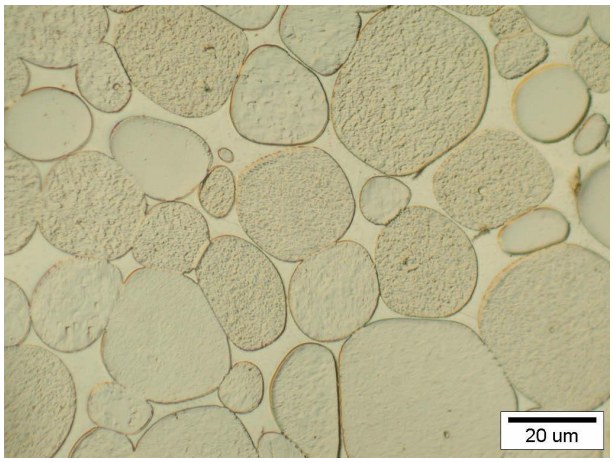
Słowa kluczowe: inżynieria materiałowa, wolframowe stopy ciężkie, struktura, właściwości

Artykuł został opracowany na podstawie referatu prezentowanego podczas X Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa", Ryn, 15-18 września 2014 r.

1. WSTĘP

Współczesne rdzenie do pocisków typu APFSDS (ang. *long rod*) są wykonywane ze stopów zubożonego uranu lub wolframowych stopów ciężkich [1]. Jakkolwiek te pierwsze wykazują o 10% większą głębokość penetracji, w porównaniu do rdzeni wolframowych, wynikającą z nieco większej gęstości i zjawiska tzw. „samoostrzenia" (ang. *self-sharpening*) związanego z powstawaniem tzw. pasm ścinania adiabatycznego – ASB (ang. *Adiabatic Shear Bands*) [2-4], to jednak coraz ostrzejsze wymagania ekologiczne, znaczne koszty wytwarzania oraz recyklingu rdzeni uranowych powodują, że zainteresowanie pociskami z rdzeniem z wolframowych stopów ciężkich (WSC) systematycznie wzrasta.

Podstawowym składnikiem WSC jest wolfram stanowiący 90-98% mas., a pozostałymi składnikami są nikiel żelazo i/lub kobalt. Wolframowe stopy są dwufazowym spiekiem, który ze względu na specyficzną mikrostrukturę składającą się z ziaren wolframu otoczonych osnową, będącą roztworem stałym na bazie niklu, jest nazywany często kompozytem wolframowym (rys. 1).



Rys. 1. Mikrostruktura wolframowego stopu ciężkiego ukazująca ziarna wolframu w osnowie będącej roztworem stałym W, Fe, Co w Ni

Fig. 1. Microstructure of tungsten heavy alloy showing tungsten grains embedded in Ni base W, Fe and Co solid solution

O ile rdzenie pocisków podkalibrowych wytwarzanych wcześniej zawierały 95-97% wag. wolframu i charakteryzowały się gęstością 17,7-18,0 g/cm^3, o tyle w konstrukcjach obecnych zawartość wolframu wynosi 90-93% wag. wolframu, a gęstość mieści się w przedziale 17,2-17,5 g/cm^3. Dzięki większemu udziałowi osnowy odznaczają się one zdecydowanie większą plastycznością.

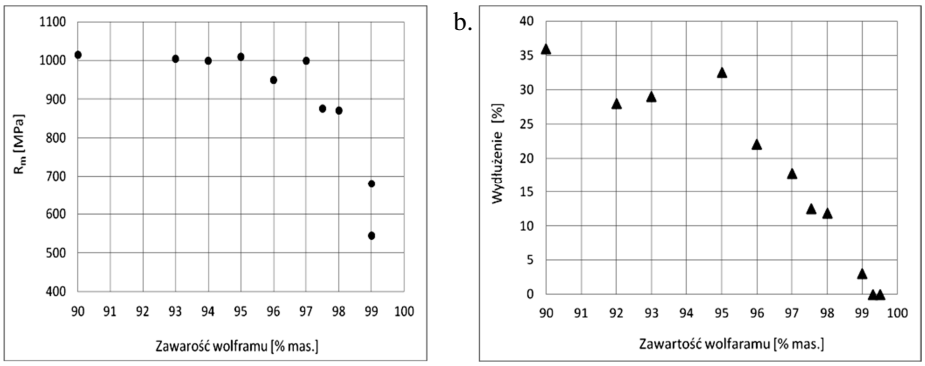
Najistotniejszym parametrem użytkowym rdzeni pocisków podkalibrowych jest głębokość penetracji, którą osiąga się przez doskonalenie procesu technologicznego oraz modyfikację konstrukcji pocisku, polegającą na zwiększeniu stosunku długości do średnicy rdzenia (*l*/*d*).

Ze względu na bardzo wysoką temperaturę topnienia wolframu równą 3420°C, wolframowe stopy ciężkie wykonuje się metodą metalurgii proszków, polegającą na zagęszczaniu mieszanki odpowiednich proszków, a następnie wysokotemperaturowym spiekaniu z udziałem fazy ciekłej – LPS (ang. *Liquid Phase Sintering*) [5]. Po dodatkowej próżniowej obróbce cieplnej wyroby odznaczają się wytrzymałością na rozciąganie rzędu 850-950 MPa. W celu zwiększenia właściwości wytrzymałościowych stosuje się obróbkę plastyczną i obróbkę cieplną, dzięki czemu wytrzymałość na rozciąganie osiąga wartość 1300-1500 MPa, a nawet powyżej 1850 MPa. Jest oczywiste, iż bardzo duża wytrzymałość jest okupiona zmniejszeniem ciągliwości, a co najważniejsze – udarności. Ta ostatnia jest krytyczna z punktu widzenia nie tylko zdolności do penetracji płyty pancernej, ale przede wszystkim zapewnienia warunków poprawnego zachowania się podczas strzału. Właściwe skojarzenie bardzo dużych wymagań odnośnie do wytrzymałości, twardości przy równoczesnym zapewnieniu odpowiednio dużej udarności jest zagadnieniem wyjątkowo złożonym. W niniejszej pracy zamieszczono wyniki ostatnich badań, z których wynika, że jest możliwe w warunkach krajowych wytworzenie WSC spełniających te wymagania. W tym miejscu wypadałoby przybliżyć, jakie są te wymagania. Na podstawie analizy wymagań sformułowanych przez producentów WSC przeznaczonych na rdzenie czołgowych przeciwpancernych pocisków podkalibrowych można stwierdzić, że są one następujące:

a) gęstość – 17,2÷17,7 g/cm^3,
b) wytrzymałość na rozciąganie R_m – 1350÷1450 MPa,
c) umowna granica plastyczności $R_{p\,0,2}$ – bliska wartości R_m,
d) twardość – 41÷43 HRC,
e) wydłużenie A_5 – 15÷19%,
f) udarność *KC*: 150÷200 J/cm^2 (w T = +20°C) oraz 100÷140 J/cm^2 (w T = –40°C).

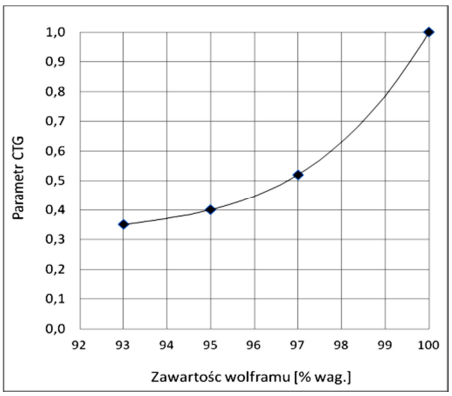
Obecne wymagania to: $R_m \approx 1650$ MPa, $A_5 \approx 6\%$ oraz $KC \geq 120$ J/cm^2 przy gęstości około 17,5 g/cm^3. W tym miejscu należy podkreślić, że wymagana duża gęstość stopu będąca, obok prędkości, jednym z najważniejszych parametrów decydujących o energii kinetycznej pocisku stanowi zasadnicze ograniczenie w możliwości równoczesnego uzyskania odpowiednio dużej wytrzymałości i udarności. Ta ostatnia cecha zależy w ogromnym stopniu od parametru spójności CTG znanego pod nazwą *contiquity*, który odzwierciedla udział powierzchni granic ziaren wolfram – wolfram do całkowitej powierzchni granic, a więc również granic międzyfazowych wolfram – osnowa [6, 7]. Generalnie, im mniejsza jest wartość parametru CTG, tym większa udarność WSC, ta zaś zależy od zawartości wolframu (rys. 2).

a. b.



Rys. 2. Wpływ zawartości wolframu na: a – wytrzymałość na rozciąganie, b – wydłużenie [6]

Fig. 2. The influence of tungsten on: a – tensile strength, b – elongation [6]



Rys. 3. Zależność parametru CTG od zawartości wolframu w WSC [6]

Fig. 3. The dependence of CTG parameter on WSC tungsten content [6]

Nie bez znaczenia jest oczywiście wartość adhezji na granicy ziarno wolframu – osnowa, która zależy w największym stopniu od czystości powierzchni granicy. Z drugiej strony im większa zawartość wolframu, która jest determinowana gęstością WSC, tym większa wartość parametru CTG (rys. 3). Z kolei wzrost wartości parametru CTG oznacza zmniejszenie wytrzymałości WSC przy równoczesnym zwiększeniu ich kruchości.

W artykule zaprezentowano wyniki badań zmierzające do uzyskania wolframowych stopów ciężkich o możliwie największej wytrzymałości, wykorzystując do tego celu metodę umacniania odkształceniowego oraz obróbkę cieplną. Wspomniano również o korzystnym oddziaływaniu dodatku kobaltu na właściwości mechaniczne WSC.

2. MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Do badań wytypowano stop o składzie W92Ni5,4Co1,5Fe1,1 z niewielką ilością Mn pełniącego funkcję odtleniacza. Próbki do badań w postaci prętów wykonano metodą spiekania z udziałem fazy ciekłej w atmosferze wodorowej. Uzyskany stop miał gęstość 17,5 g/cm^3. Tak uzyskane pręty były wyżarzane 3 godziny w temperaturze 900°C w piecu próżniowym, a następnie szybko chłodzone w wodzie (przesycanie). Po przesyceniu pręty podlegały różnym wariantom kucia rotacyjnego. Ze stopu były pobrane próbki do badań właściwości mechanicznych w celu wyznaczenia wytrzymałości na rozciąganie R_m, umownej granicy plastyczności $R_{p0,2}$ oraz wydłużenia A_5. Badania te zostały uzupełnione badaniami twardości i udarności. Ponadto, dla wybranych próbek wykonano obserwacje metalograficzne, a także obserwacje fraktograficzne. Badania właściwości mechanicznych przeprowadzono na próbkach standardowych pięciokrotnych na maszynie wytrzymałościowej przy szybkości przesuwu trawersy 5 mm/min. Badania twardości wykonano metodą Rockwella, zaś udarności na próbkach okrągłych o średnicy 8 mm bez karbu – z wykorzystaniem młota Charpy'ego o energii początkowej 150 J. Obserwacje mikroskopowe przeprowadzono na zgładach metalograficznych próbek wyciętych wzdłużnie i poprzecznie do osi pręta otrzymanego w opisanych wyżej procesach technologicznych, które sporządzono tradycyjnie metodą szlifowania i polerowania z wykorzystaniem automatycznej szlifierko-polerki firmy Tenupol. Badania metalograficzne przeprowadzono na mikroskopie optycznym OLYMPUS IX-70 przy powiększeniach od × 100 do × 1000, z wykorzystaniem techniki jasnego pola, jak również kontrastu Nomarskiego. Obserwacje fraktograficzne przeprowadzono w skaningowym mikroskopie elektronowym firmy Leo 1530 z wykorzystaniem elektronów wtórnych – SE (ang. *Secondary Electrons*). Ich celem była przede wszystkim ocena charakteru przełomu, a zwłaszcza oszacowanie udziału pęknięć transkrystalicznych przez ziarna wolframu.

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. Wyniki badań właściwości mechanicznych

Wyniki badań właściwości mechanicznych uzyskanych po różnych wariantach obróbki cieplnej i cieplno-plastycznej podano w tabeli 1. Przy oznaczaniu próbek posłużono się literami, które oznaczają odpowiednio:

p – próbki przesycone, czyli wyżarzone w piecu próżniowym przez 3 godziny w temperaturze 900°C,

z – materiał odkształcony plastycznie na zimno po przesyceniu i kuciu na kowarce dźwigniowej, a liczba wskazuje na wartość zgniotu w procentach,

s – starzenie, przy czym odpowiednie liczby (350, 700, 800 i 900) oznaczają temperaturę starzenia, a liczba po ukośniku z literą *h* oznacza czas starzenia.

Na przykład PR29z60-s800/1 h oznacza materiał, który po przesyceniu był odkształcony plastycznie ze zgniotem 60% i starzony 1 godzinę w temperaturze 800°C. Skrótowe objaśnienia dotyczące historii cieplno-plastycznej zostały podane w ostatniej kolumnie tabeli 1.

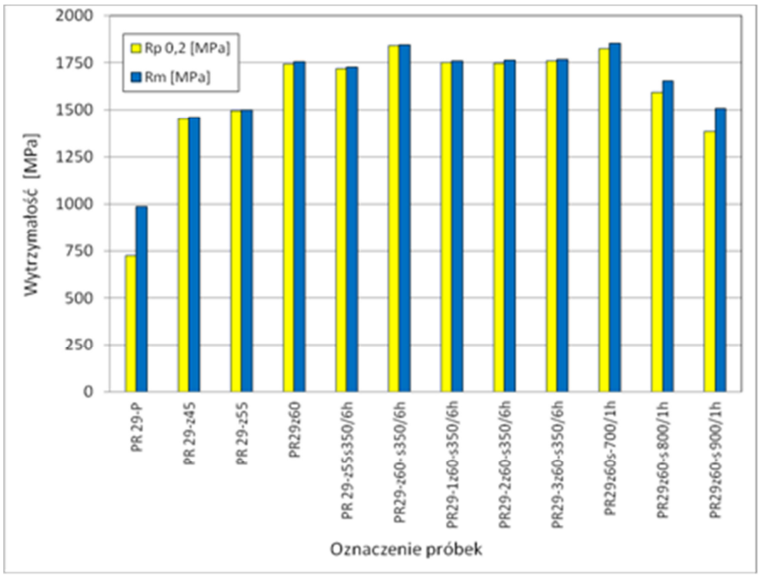
Tabela 1. Wyniki badań na maszynie wytrzymałościowej oraz wyniki pomiaru udarności

Table 1. The results of tensile and impact strength measurements

Oznaczenie próbki	$R_{p\,0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	KC [J/cm^2]	Uwagi
PR 29-P	725	989	22,15	–	PR29 przesycona 900/3 h
PR 29-z45	1452	1461,5	7,35	118	próbka przesycona 900/3 h + zgniot 45%
PR 29-z55	1495,5	1499	6,30	90	próbka przesycona 900/3 h + zgniot 55%
PR29z60	1743	1755	1,65	33,7	próbka przesycona 900/3 h + zgniot 60%
PR 29-z55s350/6 h	1720	1728	3,75	63,0	próbka przesycona 900/3 h + zgniot 55% + starzenie 6 h w 350°C
PR29-z60- s350/6 h	1842	1846	0,3	33,7	
PR29-1z60-s350/6 h	1751	1762	2,4	63,2	(materiał wejściowy PR29z55s350/6 h)
PR29-2z60-s350/6 h	1749,5	1762,5	2,15	48,5	(materiał wejściowy PR29z55s350/6 h)
PR29-3z60-s350/6 h	1758,6	1767,5	2,4	47,0	(materiał wejściowy PR29z55s350/6 h)
PR29z60s-700/1 h	1827	1852,5	2,7	37,9	materiał kuty ze zgniotem 60% + starzony 1 h w temperaturze 700°C
PR29z60-s 800/1 h	1592,5	1655	3,5	34,1	materiał kuty ze zgniotem 60% + starzony 1 h w temperaturze 800°C
PR29z60-s 900/1 h	1383	1508,5	4,3	33,7	materiał kuty ze zgniotem 60% + starzony 1 h w temperaturze 900°C

Na rysunku 4 zamieszczono wykres ilustrujący zmianę umownej granicy plastyczności $R_{p\,0,2}$ oraz wytrzymałości na rozciąganie R_m dla próbek wolframowego stopu ciężkiego po różnych wariantach obróbki cieplno-plastycznej. Z kolei na rysunku 5 pokazano ilustrację graficzną zmiany wydłużenia oraz udarności badanych stopów. Łatwo zauważyć, że właściwości mechaniczne badanego WSC zmieniają się w bardzo szerokich granicach.

I tak, właściwości wytrzymałościowe $R_{p\,0,2}$ i R_m, które są umiarkowane po przesyceniu, ulegają nawet blisko trzykrotnemu wzrostowi. Jak oczekiwano, wzrostowi właściwości wytrzymałościowych towarzyszy systematyczne zmniejszenie właściwości plastycznych, których odzwierciedleniem jest wydłużenie (rys. 5a), a także udarności (rys. 5b).

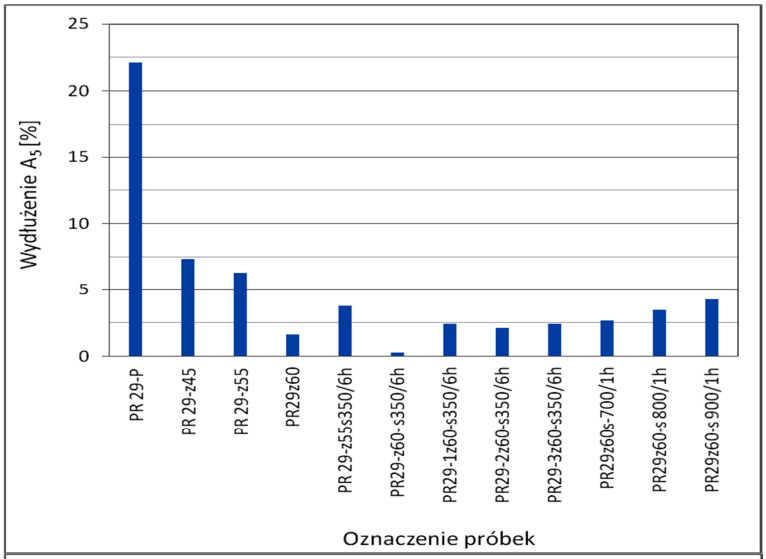


Rys. 4. Wartości umownej granicy plastyczności $R_{p\,0,2}$ oraz wytrzymałości na rozciąganie R_m wolframowego stopu ciężkiego po różnych wariantach obróbki cieplnej i/lub cieplno-plastycznej

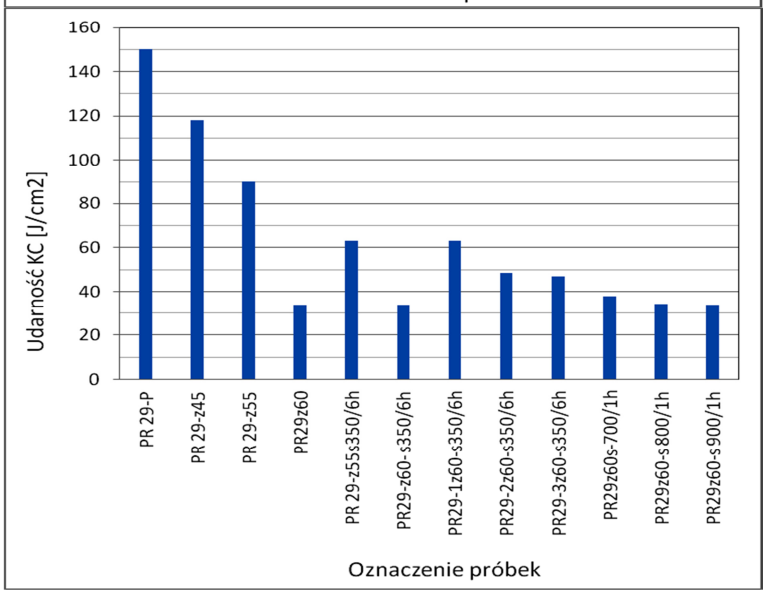
Fig. 4. The yield strength $R_{p\,0,2}$ and tensile strength R_m of tungsten heavy alloy after different heat treatment and/or thermo-mechanical treatment

Ta ostania cecha jest bardziej złożona, ponieważ udarność zależy tak od właściwości wytrzymałościowych, jak i plastycznych. Rola tych ostatnich sprowadza się przede wszystkim do zmniejszenia koncentracji naprężeń w bezpośredniej bliskości potencjalnego zakłócenia mikrostruktury – czy to w postaci nieciągłości, czy też wtrącenia.

a)



b)



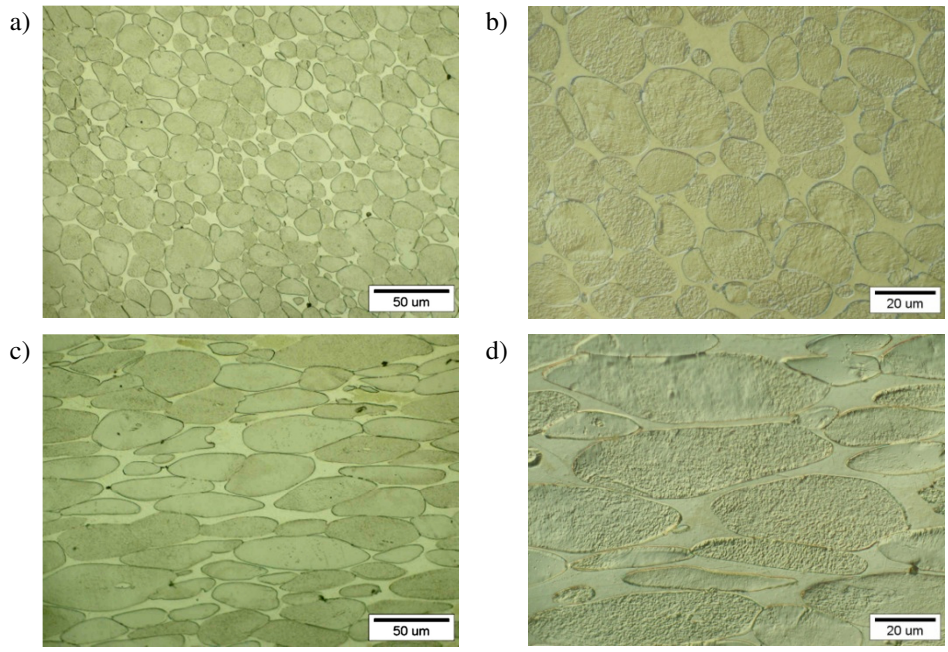
Rys. 5. Właściwości mechaniczne wolframowego stopu ciężkiego po różnych wariantach obróbki cieplnej i/lub cieplno-plastycznej: a) wydłużenie, b) udarność

Fig. 5. The mechanical properties of tungsten heavy alloy after different heat treatment and /or thermo-mechanical treatment: a) elongation, b) impact strength

3.2. Wyniki badań metalograficznych

Na rysunku 6 zamieszczono przykłady mikrostruktury badanego WSC po spiekaniu (rys. 6a) oraz po przesyceniu i po kuciu ze zgniotem 60%.

Na zdjęciach widać, że ziarna wolframowe rozmieszczone są równomiernie w osnowie będącej stopem na bazie niklu. Po spiekaniu i przesycaniu mają one kształt zbliżony do sferoidalnego (rys. 6a). Po obróbce plastycznej ziarna wolframu ulegają dwukrotnemu wydłużeniu w kierunku równoległym do osi kutego pręta (rys. 6c i d). Na zdjęciach wytrawionych zgładów WSC po obróbce plastycznej (rys. 6d) można stwierdzić specyficzny kontrast wewnątrz ziaren wolframu.



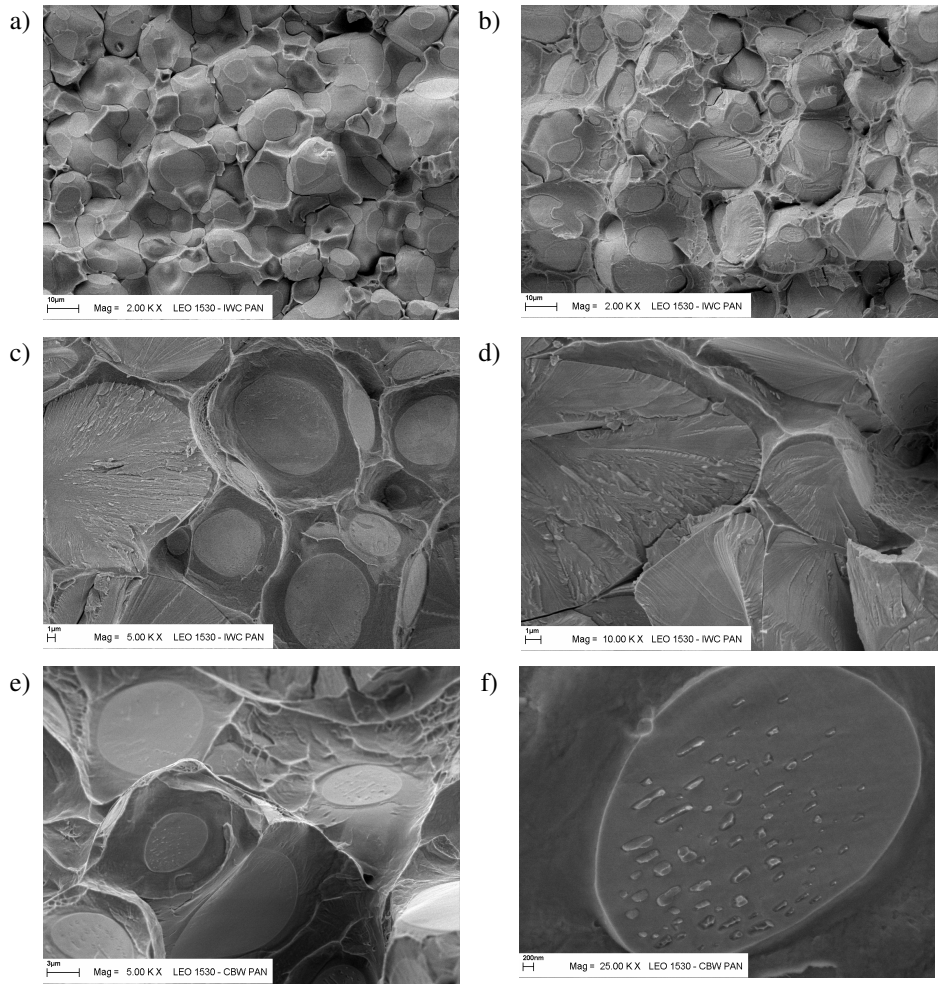
Rys. 6. Mikrostruktura WSC: a) po spiekaniu (× 500) oraz po przesyceniu i kuciu ze zgniotem 60%, b) w płaszczyźnie poprzecznej do osi pręta × 1000 oraz w płaszczyźnie równoległej do osi pręta: c) × 500 i d) × 1000. Widoczne wydłużenie ziaren wolframu spowodowane obróbką plastyczną na zimno

Fig. 6. Microstructure of WSC: a) liquid phase sintered (× 500) and supersaturated and swaged up to 60% swaging degree, b) in plane perpendicular to rod axis × 1000 and parallel to rod axis: c) × 500 and d) × 1000. The elongation of tungsten grains caused by cold working is clear visible

Kontrast ten jest najprawdopodobniej wynikiem podziału ziarna na podziarna podczas tworzenia struktury komórkowej przez przegrupowujące się dyslokacje [3, 8]. Dowodów tworzenia struktury komórkowej dostarczyły obserwacje w transmisyjnym mikroskopie elektronowym, zamieszczone w pracy Skoczylasa [10].

3.3. Wyniki obserwacji fraktograficznych

Na rysunku 7 pokazano sekwencję zdjęć ilustrującą przykłady powierzchni przełomów WSC po rozerwaniu próbek na maszynie wytrzymałościowej. Na pierwszych dwóch, ukazujących morfologię powierzchni przełomów WSC po spiekaniu (rys. 7a) i po przesyceniu (rys. 7b), widać sferyczne ziarna wolframu w osnowie roztworu stałego na bazie niklu. Morfologia powierzchni przełomu na kolejnych zdjęciach (rys. 7c i d) jest całkowicie odmienna.



Rys. 7. Morfologia przełomu WSC: a) po spiekaniu, b) po przesyceniu, c) i d) po kuciu rotacyjnym ze zgniotem 60%, e) i f) po starzeniu

Fig. 7. The morphology of WSC fracture surface: a) liquid phase sintered, b) supersaturated, c) and d) rotary swaged up to 60% swaging degree, e) and f) aged

Na zdjęciach są widoczne wyraźne pęknięcia transkrystaliczne wzdłuż płaszczyzn łupliwości wolframu z charakterystycznymi liniami dorzeczy i uskokami [11]. W niektórych miejscach można zidentyfikować pęknięcia wtórne oraz płaskie powierzchnie, tzw. „placki" będące miejscami bezpośredniego kontaktu między ziarnami W-W (rys. 7c). Na ostatnich dwóch mikrofotografiach (rys. 7e i 7f) zamiast pęknięć łupliwych widać dużą liczbę płaskich powierzchni. Wnikliwe obserwacje ujawniły obszary osnowy o ciągliwym charakterze pękania, czego dowodem są charakterystyczne kratery (rys. 7e), a także obecność drobnych cząstek na powierzchniach bezpośredniego styku między ziarnami wolframu (rys. 7f).

4. PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ I WNIOSKI

Wyniki badań właściwości mechanicznych (rys. 4) wskazują jednoznacznie, iż wolframowe stopy ciężkie stosowane do wyrobu elementów konstrukcji o przeznaczeniu specjalnym można znacząco umocnić na drodze procesu technologicznego obejmującego obróbkę cieplną i plastyczną. Stopy te, zwane niekiedy kompozytami wolframowymi, mają raczej umiarkowane właściwości mechaniczne bezpośrednio po procesie spiekania. Po wyżarzaniu w piecu próżniowym i szybkim chłodzeniu (przesyceniu), właściwości wytrzymałościowe rosną w stosunkowo niewielkim stopniu, w przeciwieństwie do właściwości plastycznych ulegających wielokrotnemu zwiększeniu. Ten przyrost plastyczności jest niezbędny do przeprowadzenia obróbki plastycznej na zimno, powodującej umocnienie odkształceniowe. W pierwszej fazie kucia rotacyjnego następuje silne odkształcanie głównie stosunkowo miękkiej osnowy, będącej roztworem stałym wolframu i żelaza w niklu. Odkształcanie ziaren wolframu rozpoczyna się dopiero wówczas, gdy osnowa umocni się do wartości porównywalnej z naprężeniem uplastyczniającym wolframu [8, 9]. Po jego osiągnięciu dokonuje się ich odkształcanie plastyczne, wskutek którego sferyczne początkowo ziarna wolframu (rys. 6a) zmieniają swój kształt w kierunku elipsoidalnym (rys. 6c i d). Zgodnie z wykresem zamieszczonym na rysunku 4, wraz ze zwiększaniem zgniotu rosną właściwości wytrzymałościowe, ale wzrost ten jest okupiony zmniejszaniem wydłużenia oraz udarności.

Starzenie w niewielkim stopniu wpływa na wzrost wytrzymałości, jak również wydłużenia, które rośnie minimalnie, zwłaszcza podczas starzenia w wyższym zakresie temperatury (700-900°C). Starzenie 6 h w temperaturze 350°C powoduje niewielkie zwiększenie udarności, podczas gdy starzenie 1 h w zakresie temperatury 700-900°C powoduje systematyczne jej zmniejszenie, które jest tym większe, im wyższa była temperatura starzenia (rys. 4).

Wcześniejsze badania możliwości umacniania wydzieleniowego wykazały, że szybkie chłodzenie po wyżarzaniu w piecu próżniowym prowadzi do przesycenia osnowy wolframem [11].

Nie stwierdzono jednak, aby podczas starzenia w niskiej temperaturze wydzielały się ultradyspersyjne cząstki, które mogłyby skutecznie umacniać osnowę wskutek blokowania ruchu dyslokacji w systemach poślizgu. Z kolei wyżarzanie w temperaturze powyżej 700°C prowadzi do intensywnej dyfuzji, w wyniku której na granicach ziaren wolfram – wolfram i zapewne granicach międzyfazowych wydzielają się cząstki pokazane na rysunku 7f. Jakkolwiek nie podjęto prób ich identyfikacji, można sądzić, że są to cząstki jednej z trzech faz międzymetalicznych [13], które nie tylko zmniejszają wytrzymałość na granicy ziaren, ale również mogą pełnić funkcję koncentratorów naprężenia, a tym samym wpływać niekorzystnie na wytrzymałość, zwłaszcza w warunkach obciążeń dynamicznych.

W tym miejscu warto wspomnieć o korzystnym wpływie wyżarzania w piecu próżniowym w temperaturze 900°C. Wyżarzanie to spełnia dwojaką funkcję. Po pierwsze umożliwia usunięcie wodoru, który zapewne jest obecny w stopie, którego spiekanie odbywało się w atmosferze wodoru. Po drugie, wyżarzanie powoduje usunięcie (rozpuszczenie) ewentualnych zanieczyszczeń segregujących zarówno na granicach ziaren, jak i międzyfazowych. Powyższe przyczynia się do znaczącego wzrostu adhezji na granicach wolfram – wolfram oraz wolfram – osnowa. Wytrzymałość ta osiąga wartość przekraczającą wartości naprężenia rozdzielczego w płaszczyznach łupliwości typu {100} oraz {110} wolframu, czego dowodem są zdjęcia przełomów pokazane na rysunkach 7c i 7d.

Analiza wyników badań właściwości mechanicznych zamieszczonych na rysunkach 4 i 5 wskazuje na to, że jest możliwe uzyskanie wolframowych stopów ciężkich o bardzo dużej wytrzymałości i równocześnie dobrej udarności. Warunkiem koniecznym jest jednak zachowanie równowagi pomiędzy wytrzymałością a plastycznością zapewniającą niezbędną udarność stopu. Jak wynika z wykresów, w wypadku badanego stopu, jest to możliwe przy zastosowaniu technologii obróbki cieplno-plastycznej, w której zgniot nie przekroczy 45-55%. Jak wynika z wykresów (rys. 4 i 5), wytrzymałość na rozciąganie osiąga wówczas wartość ok. 1500 MPa przy udarności 120 i 90 J/cm^2, odpowiednio dla zgniotu 45 i 55%. Jak wykazały wyniki ostatnich badań [12], korzystne jest oddziaływanie kobaltu pod warunkiem kontrolowanej jego ilości w WSC. Zbyt duża jego zawartość prowadzi do gwałtownego wzrostu kruchości, a tym samym drastycznego zmniejszenia udarności.

Wyniki badań oraz zamieszczona wyżej analiza umożliwiają zaproponowanie następujących wniosków:

1. Możliwe jest wytworzenie w warunkach krajowych wolframowych stopów ciężkich o bardzo dużej wytrzymałości (powyżej 1500 MPa) i udarności na poziomie 100 J/cm^2.

2. Uzyskanie bardzo dużych właściwości wytrzymałościowych jest uwarunkowane dążeniem do utworzenia mikrostruktury charakteryzującej się możliwie małą wartością parametru CTG. Metodami umożliwiającymi uzyskanie małej wartości CTG są:
   - zapewnienie odpowiednio dużego udziału osnowy, który (przy założonej gęstości WSC) można uzyskać przez zwiększenie rozpuszczalności wolframu i/lub innych pierwiastków w osnowie na bazie Ni,
   - technologia sprzyjająca „wprowadzeniu" materiału osnowy między ziarna wolframu.
3. Konieczna jest optymalizacja wartości zgniotu i sposobu jego realizacji.

LITERATURA

[1] Erhardt N.B., Suri P., German R.M., A study of microstructural evolution of tungsten heavy alloys during liquid phase sintering, *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials* 2003, Part 5, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, USA, pp. 52-58, 2003.

[2] Magness L.S., Kapoor D., Flow-softening tungsten composites for kinetic energy penetrator applications, *Proceedings of the 3rd International Conference on Tungsten and Refractory Metals*, pp. 11-20, McLean, Virginia, USA, 1994.

[3] Kaczorowski M., Nowak W., Skoczylas P., Zjawiska występujące w rdzeniach pocisków podczas penetracji płyty, *Materiały XVI Konferencji Naukowo-Technicznej UZBROJENIE,* Rynia, s. 213-219, 2007.

[4] Bose A., Couque H., Langford J. Jr., Shear localization in tungsten heavy alloys, *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, vol. 4, Non-Ferrous Materials, pp. 85-94, 1992.

[5] German R.M., Critical developments in tungsten heavy alloys, *Proceedings of the 1st International Conference on Tungsten & Tungsten Alloys*, pp. 3-13, 15-18 November 1992, Arlington, Virginia, USA, 1992.

[6] Edmonds D.V., Structure-property relationships in sintered heavy alloys, *Refractory Metals & Hard Materials*, vol. 10, pp. 15-26, 1991.

[7] Weerasooriya T., Moy P., Dowling P.J., Effect of W-W grain contiquity on the high shear strain rate behavior of 93W-5Ni-2Fe tungsten heavy alloy, *Proceedings of the 2nd International Conference on Tungsten and Refractory Metals*, pp. 401-409, Princenton, 1993.

[8] Ghosal P., Bagchi T.P., Muralenndharan K., Sarma B., TEM studies on liquid phase sintered W-Ni-Co alloy system, N. *P/M Science & Technology Briefs*, vol. 2, no. 5, pp. 14-17, 2000.

[9] Ebkoml B., Tungsten heavy metals, *Scandinavian Journal of Metallurgy*, vol. 20, pp. 190-197, 1991.

[10] Kaczorowski M., Skoczylas P., Krzyńska A., The strengthening of weight heavy alloys during heat treatment, *Archives of Foundry Engineering*, vol. 14, pp. 75-80, 2012.
[11] Metals Handbook, vol. 12, *Fractography*, ASM, Ninth Edition, Metals Park, Ohio, 1978.
[12] Skoczylas P., *Wpływ dodatku kobaltu na strukturę i właściwości mechaniczne wolframowych stopów ciężkich*, rozprawa doktorska, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2013.
[13] Massalski T.B., *Binary Phase Diagram*, ASM International, 1990.

Creation of the Structure and Mechanical Properties of Tungsten Heavy Alloys for Special Application

Mieczysław KACZOROWSKI, Paweł SKOCZYLAS

Abstract. The paper presents the results of experimental studies aimed at elaboration of the manufacturing technology of tungsten heavy alloys (WSC) with high mechanical properties, dedicated for kinetic energy penetrators of armour piercing fin stabilized discarding sabot (APFSDS) ammunition. Especially, the results of mechanical properties' investigations and structure observations of the materials strengthened by cold work and heat treatment involving supersaturation and aging are described. It was concluded that the best method of WSC strengthening is cold working, involving strain hardening both tungsten grain and Ni-based matrix. The cold working should be carried out under control because it excesses deformation causing very high strength and hardness increase is accomplished by the cost of substantial ductility, especially impact strength decrease. The solution heat treatment in vacuum furnace followed by water quenching and then isothermal aging at temperature range of 500-800°C enable further strength and hardness increase of WSC but its effectiveness is substantially less than cold work strengthening.
Keywords: materials science and engineering, tungsten heavy alloys, structure, properties