

WOLFRAMOWE SPIEKI CIĘŻKIE – WŁAŚCIWOŚCI, WYTWARZANIE I ZASTOSOWANIE

Streszczenie: Współczesna literatura wiele uwagi poświęca wytwarzaniu oraz badaniu metali ciężkich na bazie wolframu (Tungsten Heavy Alloys - WHA), który nadaje spiekom wyjątkowych właściwości. W artykule scharakteryzowano właściwości spieków ciężkich oraz współczesne możliwości zastosowań. Przystawiono proces wytwarzania kompozytów wolframowych techniką metalurgii proszków z wyjaśnieniem zjawisk, jakie zachodzą w poszczególnych etapach. Omówiono również wpływ różnych dodatków na właściwości wytwarzanych metali ciężkich.

Słowa kluczowe: kompozyty wolframowe, spieki ciężkie, metale ciężkie, wytwarzanie, zastosowanie, właściwości spieków, metalurgia proszków.

TUNGSTEN HEAVY ALLOYS – PROPERTIES, PRODUCTION AND APPLICATION

Abstract: There is a lot of contemporary literature items about production and testing heavy metals based on tungsten (Tungsten Heavy Alloys - WHA) that provides exceptional properties of sintered powders. The performance of heavy sintered metals and their capacities for application are presented in the paper. The manufacturing process of tungsten composites by the powder metallurgy technology with outlining the phenomena taking place at particular stages is presented. The influence of various additives on properties of produced heavy metals is also discussed.

Keywords: tungsten composites, heavy sintered alloys, heavy metals, production, application, properties of sintered alloys, powders metallurgy.

1. Wstęp

Spiekami ciężkimi nazywamy materiały spiekane o wysokiej gęstości, która przekracza $16,5 \text{ g/cm}^3$. Od 2004 roku zastąpiono nazwę „spieki ciężkie” określeniem „metale ciężkie” zgodnie z obowiązującą normą PN-EN ISO 3252. Największe zainteresowanie współczesnych naukowców jest ukierunkowane na metale ciężkie na bazie wolframu. Skład takiego spieku to 80-98 % wolframu i zrównoważona ilość fazy wiążącej, stanowiącej roztwór metalicznej osnowy, na przykład Ni i Fe lub Cu.

W niniejszej pracy podjęto próbę scharakteryzowania metali ciężkich na bazie wolframu pod względem ich wyjątkowych właściwości oraz sposobu wytwarzania techniką metalurgii proszków. Przedstawiono możliwości zastąpienia dotychczas stosowanych materiałów kompozytami wolframowymi, jak również szeroki zakres zastosowań w przemyśle cywilnym i wojskowym.

2. Właściwości metali ciężkich

Wolfram wykazuje wiele interesujących właściwości, które czynią go niezastąpionym w wielu dziedzinach przemysłu [1]. Ma bardzo wysoką gęstość ($19,3 \text{ g/cm}^3$) oraz najwyższą temperaturę topnienia spośród wszystkich metali, tj. 3422°C . Charakteryzuje go bardzo niska prężność par, ściśliwość i rozszerzalność cieplna, duża wytrzymałość i twardość w szerokich granicach temperaturowych oraz dobre przewodnictwo cieplne i elektryczne. Jednakże pomimo wielu zalet ma względnie dużą podatność na utlenianie (szczególnie w podwyższonych temperaturach) oraz niedostateczną obrabialność. Ograniczenia te powodują, że należy wzbogacać wolfram o dodatkowe składniki, tworząc w rezultacie dwu-, trój- lub więcej fazowe układy [2].

Podstawowe właściwości spieków wolframowych mogą zmieniać się w szerokim zakresie tj. odporność na rozciąganie (800-980 MPa), granica plastyczności (530-590 MPa) i względne wydłużenie (10-40 %).

Wpływ na właściwości spieków ma nie tylko skład chemiczny, ale również budowa fazy wiążącej (stopień czystości proszków, wielkość cząstek).

Właściwości WHA zależą od porowatości szczątkowej, która gdy jest zbyt duża, jest redukowana przez właściwe spiekanie, oraz od kruchości wodorowej, likwidowanej przez dodatkowe wyżarzanie w próżni lub argonie. Korzystny wpływ na parametry spieków ma równomierność rozłożenia ziaren wolframu w fazie wiążącej oraz dobrze rozwinięta powierzchnia styku pomiędzy poszczególnymi ziarnami wolframu. Niekorzystny wpływ na właściwości natomiast mają ilości i umiejscowienia wtrąceń, zanieczyszczeń w strukturze.

Podstawowe właściwości wolframowych spieków ciężkich zostały przedstawione w Tabeli 1 wraz z parametrami mechanicznymi stali, dla lepszego zobrazowania bardziej interesujących i korzystniejszych właściwości metali ciężkich. Można zauważyć, że stal charakteryzuje się zdecydowanie gorszymi właściwościami w porównaniu z WHA.

Tabela 1. Parametry mechaniczne WHA i stali

Właściwość	Wartość parametru	
	WHA	Stal
Gęstość [g/cm^3]	17,0-18,6	7,85
Granica plastyczności [MPa]	530-790	230-280
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	800-980	294-490
Wydłużenie względne [%]	10-40	23
Twardość [HB30]	250-450	200-300
Udarność [J/cm^2]	100-300	-

Metale ciężkie na bazie wolframu charakteryzują się również wysokim modułem elastyczności, znakomitymi właściwościami tłumienia drgań, dobrą obrabialnością, wysoką zdolność absorpcji promieniowania rentgenowskiego i gamma oraz dobrą cieplną i elektryczną przewodnością.

Szczególnie pożądane w przemyśle są kompozyty, zawierające obok wolframu metale z grupy tzw. wysokotopliwych [3]. Zaliczyć do nich możemy metale przejściowe takie jak: tytan, wanad, niob, tantal, chrom, molibden oraz ren. Charakteryzują się one takimi właściwościami jak wysoka gęstość, obojętność chemiczna, odporność na korozję i działanie kwasów itp.

Pierwszymi opracowanymi WHA były mieszaniny metali W-Ni-Cu. Spieki te mają małą odporność na korozję i niezadowalające właściwości mechaniczne. Kolejnymi to metale ciężkie W-Ni-Fe, które posiadają większe możliwości zastosowania, zwłaszcza te o składach: 93W-4,9Ni-2,1Fe oraz 95W-4Ni-1Fe.

Zgodnie z literaturą [4,5] metalami podwyższającymi właściwości wolframu i ich stopów są: Co, Mo, Ta, Re, Tr, Ti (szczególnie Re). Spiekom z dodatkiem renu przypisuje się szczególną rolę [6]. Gęstość renu, która wynosi $21,02 \text{ g/cm}^3$, powoduje poprawienie parametrów mechanicznych wolframowych kompozytów. Poza tym pierwiastek ten charakteryzuje się znacznie większą zdolnością do odkształceń plastycznych (3,5 razy lepsza od wolframu). Stopy wolframowo-renowe posiadają bardzo dobre właściwości mechaniczne, dobrą przewodność elektryczną, wysoką odporność na korozję i erozję oraz dużą odporność na działanie łuku elektrycznego. Literatura [4-6] dotycząca metali ciężkich z osnową wolframową wzbogaconą w ren przeznaczoną na rdzenie do pocisków pozwala na postawienie następujących wniosków:

- dodatek renu powoduje wyraźne zmniejszenie ziaren wolframu w strukturze metalu, co powoduje podwyższenie wytrzymałości i twardości,
- następuje zmiana zakresu kruchości materiału, która korzystnie wpływa na przebijalność pancerzy przez rdzenie wykonane z tego materiału.

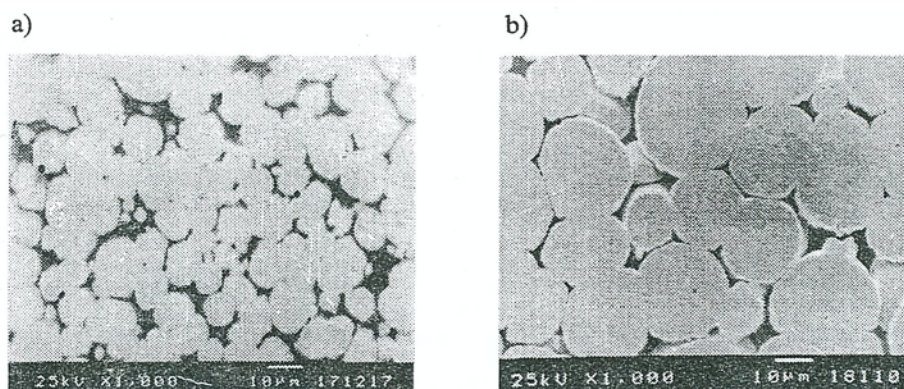
W artykule [7] przedstawiono badania metali ciężkich z osnową wolframową (W-Ni-Fe) wzbogaconą 3 % dodatku renu. Dodatek renu stanowił proszek metalicznego renu lub proszek renianu (VII) amonu w ilości odpowiadającej po redukcji 3 % renu. W Tabeli 2 przedstawiono wyniki pomiarów właściwości uzyskanych metali ciężkich bez i z dodatkiem renu.

Tabela 2. Właściwości metali ciężkich z osnową wolframową [7]

Właściwości	Metale ciężkie		
	87W-7Ni-3Fe-3Re ren z prosz.metal.	87W-7Ni-3Fe-3Re ren z NH_4ReO_4	90W-7Ni-3Fe
Gęstość teoretyczna, ρ_t [g/cm^3]	17,19	17,19	17,15
Gęstość spieków, ρ [g/cm^3]	17,01	17,08	17,15
Porowatość, P_s [%]	1,05	0,64	0
Granica plastyczności przy rozciąganiu, R_e [MPa]	970	842	680
Wytrzymałość na rozciąganie, R_m [MPa]	1021	1150	930
Wydłużenie przy rozciąganiu, A_5 [%]	9,1	18,7	30
Wytrzymałość na ściskanie, R_c [MPa]	4795	4900	4300
Twardość, HV5	420	373	335
Udarność, K [J/cm^2]	52,5	96,7	165

Spieki z dodatkiem renu charakteryzują się wyższą wytrzymałością na rozciąganie i ściskanie niż klasyczne spieki z osnową wolframową. Ponadto wzrosła twardość spieków z dodatkiem, a zmniejszeniu ulegała ich udarność. Możliwe jest stosowanie jako prekursora renu proszku renianu (VII) amonu zamiast metalicznego renu, dzięki czemu proces wytwarzania mieszaniny proszków z dodatkiem Re jest znacznie tańszy [7].

Rysunek 1 przedstawia mikrostruktury sferoidalnych ziaren wolframu otoczonych fazą wiążącą z oraz bez dodatku renu. Ziarna wolframu w spiekach z renem są wyraźnie mniejsze: średnie wielkości ziaren dla mieszaniny W-Ni-Fe to $25,6 \mu\text{m}$, zaś dla mieszaniny W-Ni-Fe-Re – $11,7 \mu\text{m}$.



Rys. 1. Zdjęcia mikrostruktury spieków wolframowych wykonane za pomocą mikroskopu skaningowego: a) 87W-7Ni-3Fe-3Re, b) 90W-7Ni-3Fe [7]

Badania wykazały, że innym metalem korzystnie wpływającym na właściwości spieków ciężkich na bazie wolframu jest nikiel [8]. Prowadzi on do obniżenia temperatury i czasu spiekania (zmniejszenie strat energetycznych) oraz poprawienia właściwości mechanicznych gotowego wyrobu.

Domieszki takich pierwiastków jak węgiel czy krzem, nawet w niewielkiej ilości, sprawiają, że spieki wolframowe stają się kruche i pogorszenie ich parametrów.

3. Wytwarzanie spieków ciężkich

Najlepszą techniką wytwarzania metali ciężkich jest metalurgia proszków. Metalurgia proszków to nie tylko wytwarzanie proszków metali, ale również materiałów metalowych lub ich mieszanin oraz otrzymywanie półproduktów i produktów z tych proszków. Technika ta pozwala na uzyskiwanie materiału o ściśle określonym składzie chemicznym i wysokim stopniu czystości, jak również o dużej dokładności wymiarowej. Metalami wykorzystywanymi do spieków są metale wysokotopliwe lub ich prekursorzy w postaci tlenków lub soli.

Proces metalurgii proszkowej obejmuje następujące etapy:

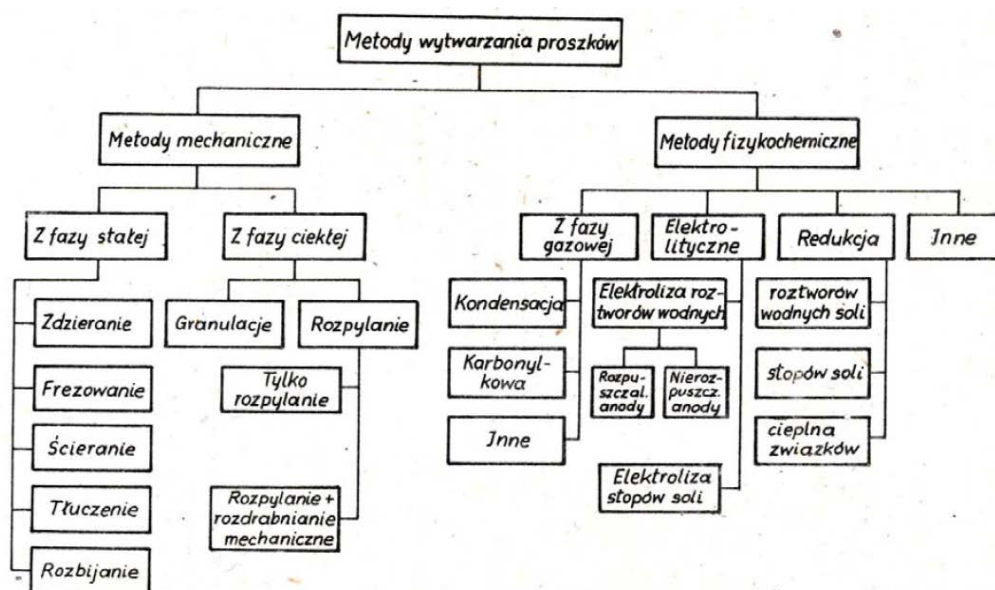
- wytwarzanie proszków,
- formowanie proszku na zimno,
- spiekanie,
- obróbka końcowa.

Wytwarzanie proszków można podzielić na dwie grupy: mechaniczne i fizykochemiczne [9]. Metodę mechaniczną przeprowadza się z fazy stałej lub z fazy ciekłej. Otrzymywanie proszków z fazy stałej polega na fizycznym rozdrobnieniu większych kawałków wyjściowego metalu za pomocą różnego typu obrotowych młynów kulowych lub młódczy. Obejmuje takie czynności jak: frezowanie, zdzieranie, ścieranie, tłuczenie, rozbijanie itp. Natomiast otrzymywanie proszków z fazy ciekłej polega na przeprowadzeniu metalu w stan ciekły, a następnie rozpyleniu go w strumieniu np. wody, powietrza metodą RZ (Roheisen-Zunder'a , tzn. zgorzelina na surówce żelaza) lub gazu obojętnego metodą VIGA (Vacuum Induction Gas Atomisation). Fizykochemiczne wytwarzanie proszków przeprowadza się poprzez:

- redukcję związków (np. cieplną, redukcję węglem lub wodorem),
- kondensację z fazy gazowej (otrzymywanie metali niskotopliwych np. cynku),
- rozkład karbonylków (otrzymywanie drobnoziarnistych proszków kulistych o wysokiej czystości np. żelazo, nikiel, kobalt oraz wytwarzania materiałów o właściwościach magnetycznych),

- elektrolizę roztworów wodnych lub stopionych soli (otrzymywanie żelaza, niklu, manganu, chromu, srebra).

Dla lepszego zobrazowania metod wytwarzania proszków metali zamieszczono Rysunek 2.



Rys. 2. Schematyczny podziału metod wytwarzania proszków [10]

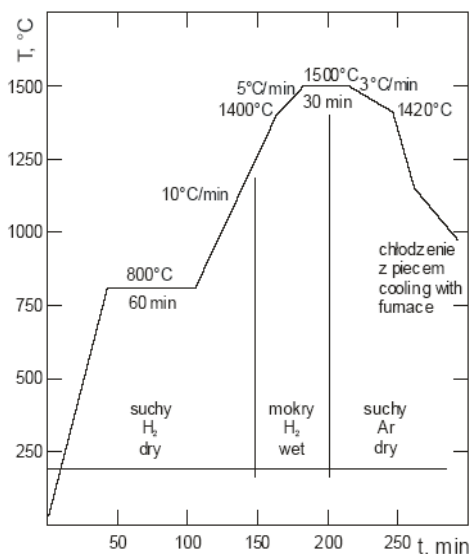
Kolejnym etapem metalurgii proszków jest ich formowanie poprzez prasowanie, które polega na poddawaniu proszków ścisaniu w zamkniętej przestrzeni, w wyniku czego następuje ich zagęszczenie. Dla lepszego efektu prasowania stosuje się dodatki substancji poślizgowych, które zmniejszają siły tarcia i ułatwiają poślizg między cząstkami i elementami roboczymi matrycy. W tym celu dodaje się takie substancje jak grafit, stearyna, gliceryna, alkohol, eter, aceton czy benzyna w ilościach nie przekraczających 1% mas.

Trzeci etap stanowi spiekanie, czyli zastosowanie procesu cieplnego, którego zadaniem jest dokonanie takich zmian fizykochemicznych cząstek, aby nastąpiło ich złączenie i w konsekwencji przekształcenie sprasowanych proszków w możliwie jednolity, dobrze zespolony materiał. Do podstawowych parametrów warunkujących proces spiekania należą: temperatura, czas, skład chemiczny atmosfery pieca, charakterystyka geometryczna cząstek proszku, skład chemiczny mieszanki proszków oraz gęstość wyprasek.

Proces spiekania odbywa się w atmosferze ochronnej gazu obojętnego, najczęściej azotu lub argonu przeciwdziałającej utlenianiu wyprasek. Możliwe jest również stosowanie wodoru (wilgotnego lub suchego) lub też zdysocjowanego amoniaku (75 % H₂ i 25 % N₂), który sprzyja dodatkowo odwęglaniu materiału. Natomiast zastosowanie do spiekania spieków próżni jest dość kosztowne i mało wydajne, dlatego jest rzadko używana.

Spiekanie można podzielić na wstępne i właściwe (końcowe). Spiekanie wstępne przeprowadzane jest w niższej temperaturze i ma na celu scalenie proszku w stopniu umożliwiającym przeprowadzenie następnych operacji formowania. Dla wolframowych spieków ciężkich proces ten jest prowadzony w atmosferze suchego wodoru, w celu usunięcia warstewek tlenkowych z powierzchni ziaren proszków. Następnie metale ciężkie na bazie wolframu poddaje się spiekaniu właściwemu w atmosferze wilgotnego wodoru, aby zapobiec tworzeniu się w porach pary wodnej [11]. Schemat procesu

spiekania wolframowych spieków ciężkich przedstawiono na Rysunku 3.



Rys. 3. Schemat procesu spiekania WHA

W celu poprawienia wytrzymałości spieków ciężkich możliwe jest zastosowanie końcowej obróbki plastycznej, czyli poddanie materiału takim procesom technologicznym jak wyciskanie, walcowanie, czy też różnego rodzaju kuciom [3]. Obróbka skrawaniem spieków ogranicza się do wykonywania wcięć, wiercenia otworów w kierunku poprzecznym do kierunku prasowania. Innym rodzajem przetwarzania spieków jest obróbka cieplna i cieplno-chemiczna spieków, której celem jest poprawienie właściwości eksploatacyjnych (np. dla spieków żelaza nawęglanie, cyjanowanie). Natomiast obróbka zwana nasycaniem metali ciężkich pozwala na:

- zamykanie porów otwartych,
- zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie,
- poprawę odporności na korozję,
- nadanie powierzchni określonych właściwości ślizgowych i odporności na ścieranie,
- zmniejszenie współczynnika tarcia powierzchni.

Zastosowanie obróbki powierzchniowej powoduje zabezpieczenie spieków przed korozją, nadanie im walorów dekoracyjnych, zwiększenie twardości i odporności na zarysowania (np. obróbka galwaniczna – niklowanie, chromowanie, cynkowanie) [9].

W celu poprawienia właściwości mechanicznych spieków na bazie wolframu stosuje się możliwie najczystsze proszki, o jak największym rozdrobnieniu. Dotychczas proszki stosowane do wytwarzania spieków ciężkich miały nieregularne kształty i wymiary od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów. Artykuł [12, 13] przedstawia przykład możliwości zastosowania mieszaniny proszków metali (wolfram-rem) o wymiarach nanometrycznych do wytwarzania spieków ciężkich. Nanoproszki zostały otrzymane na drodze syntezy spaleninowej. Tego typu spieki mają znacznie lepsze właściwości niż ich odpowiedniki otrzymane z proszków o mikrometrowych rozmiarach. Porównanie niektórych parametrów spieków wolframowych wykonanych z proszków o różnych rozmiarach cząstek przedstawiono w Tabeli 3.

Tabela 3. Porównanie wyników pomiarów gęstości i porowatości spieków z proszków o mikro- i nanometrycznych wymiarach [12]

Spieki	Gęstość [g/cm ³]		Porowatość [%]
	wypraska	po spiekaniu właściwym w 1700°C	po spiekaniu właściwym w 1700°C
95W-5Re mikro	11,58	11,68	39,84
95W-5Re nano	8,09	12,57	35,16

Spieki wytworzone z nanoproszków charakteryzują się wyższą gęstością niż te wyprodukowane z proszków mikrometrycznych, a po spiekaniu końcowym posiadają niższą średnią porowatość.

W pozycji literaturowej [11] przedstawiono metodę wytwarzania spieków o średnim składzie chemicznym 90W-7Ni-3Fe rozpuszczone w osnowie o składzie 55Ni-23Fe-22W. Polepszono ich właściwości poprzez obróbkę plastyczną i obróbkę cieplną. Jako metody obróbki plastycznej zastosowano metody wyciskania hydrostatycznego, kucia rotacyjnego, kucia na młotkarce dźwigniowej oraz walcowej. Uzyskane wyniki pozwalają wnioskować, iż spieki wolframowe po obróbkach posiadają znacznie lepszą twardość i właściwości wytrzymałościowe. Obróbka cieplna spowodowała wydzielenie się wolframu w fazie wiążącej w wyniku czego spieki uległy większemu utwardzeniu.

4. Zastosowanie metali ciężkich

Bardzo korzystne właściwości wolframowych metali sprawiają, że materiały te znajdują wiele zastosowań. Ze względu na możliwość zachowywania swoich właściwości w wysokich temperaturach, wykonuje się nimi styki elektryczne pracujące przy dużych obciążeniach prądowych, elektrody do drążenia elektroiskrowego i spawania oraz matryce do wielokrotnych procesów wytłaczania, wyciskania czy odlewania, które specjalnie zaprojektowane zapobiegają rozwarstwianiu lub pękaniu.

Wysoka gęstość sprawia, że spieki są stosowane do produkcji balastów samolotów oraz sprzętu sportowego, takiego jak: końcówki kii golfowych, kule do miotaczy, ciężarki dla wędkarzy, pociski dla myśliwych oraz lotki do rzucania.

Spieki ciężkie charakteryzuje możliwość tłumienia drgań. Pozwala to na wykorzystanie wolframowych kompozytów jako elementów silników (np. wały korbowe, tłoki, łopatki turbin), części narzędzi maszynowych, części samolotów [17, 18].

Zdolność do pochłaniania promieniowania wolframowych metali ciężkich jest wykorzystywana w medycynie: do produkcji osłon radiacyjnych, jak również zbiorników na materiały radioaktywne.

Dzięki dużej wytrzymałości mechanicznej wykorzystywane są do wytwarzania części maszyn. Bardzo znaczącą dziedziną zastosowań wolframowych spieków ciężkich są nowoczesne rdzenie do całej gamy pocisków np. przeciwpancernych. Wolframowe metale ciężkie ze względów ekologicznych i zdrowotnych zastępują dotychczas stosowane rdzenie zeubożonego uranu [14-18]. Kompozyty te służą również jako materiał do części produktów wojskowych takich jak: pancerze/skorupy czołgów, statków, samolotów i wielu innych wojskowych pojazdów kuloodpornych, głowice szrapnelów, granaty itp. Wolframowe metale ciężkie wykorzystywane są w postaci kul lub śrut do wiatrówek, dubeltówek oraz różnego typu broni palnej.

5. Podsumowanie

W przemyśle wojskowym wolfram, dzięki dużej twardości i odporności na wysoką temperaturę jest stosowany do wielu wyrobów, np. na rdzenie do pocisków przeciwpancernych. Metalurgia proszków ma bardzo duże możliwości rozwojowe i umożliwia wytwarzanie różnorodnych spieków metali oraz spiekanych kompozytów z osnową metaliczną do zaawansowanych zastosowań.

Ciągle rosnące perspektywy wykorzystania spiekanych materiałów pozwalają na tworzenie proszków o unikatowych właściwościach i składach. Literatura opisuje możliwości wytwarzania spieków metali z niemetalami (Cu + grafit, metal + ceramika, metal + polimer), porowatych spiekanych materiałów filtracyjnych lub samosmarujących, czy też spiekanych materiałów żarowytrzymałych. Przyszłościowym kierunkiem rozwoju produkcji spieków ciężkich jest łączenie metalurgii proszków i nanotechnologii ze względu na możliwości otrzymywania surowców o nowych, lepszych parametrach mechanicznych.

Literatura

- [1] Lassner E., Schubert W. D., Tungsten: Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds, 1999
- [2] Majewski T., Michałowski J., Piętaszewski J., Metody wytwarzania i właściwości metali ciężkich W-Ni-Fe-Re, Inżynieria materiałowa, 2, 2008
- [3] Michałowski J., Piętaszewski J., Włodarczyk E., Obróbka plastyczna jako część procesów wytwarzania metali wysokotopliwych i metali z osnową wolframową, Biuletyn WAT, vol. LIV (12), str. , 2005
- [4] German R.M., Critical developments in tungsten heavy alloys, Proceedings of the First International Conference on Tungsten and Tungsten Heavy Alloys, 3-13, Arlington, Virginia, 1992
- [5] Jakobson D.L., Luo A., Solution softening and dispersion strengthening in tungsten, Proceedings of the First International Conference on Tungsten and Tungsten Heavy Alloys, 233-240, Arlington, Virginia, 1992
- [6] Włodarczyk E., Michałowski J., Piętaszewski J., Wpływ dodatku renu na właściwości i strukturę spieków ciężkich z osnową wolframową, Biuletyn WAT, vol. L (12), str. 87-101, 2001,
- [7] Włodarczyk E., Michałowski J., Piętaszewski J., Właściwości spieków WHA z dodatkiem renu, biuletyn WAT, vol. LII (02), str. 17-23, 2003
- [8] Gacek S., Radoń A., Olszewska I., Goleń R., Wpływ aktywującego dodatku niklu na zmiany gęstości i struktury spieków wolframu, Rudy Metale R 43 1998 nr 3
- [9] Nowacki J., Spiekane metale i kompozyty z osnową metaliczną, Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2005
- [10] Ostrowski T., Metalurgia proszków, Politechnika Lubelska, 1978.
- [11] Ludyński Z., Bucki J.J., Kompozyty wolframowe, Kompozyty (Composites), vol. 4 (11), str. 243-247, 2004
- [12] Majewski T., Cudziło S., Czugała M., Zastosowanie spaleniowej syntezy do wytwarzania nanoproszków wolframu i renu przeznaczonych na spieki ciężkie, Biuletyn WAT, vol. LVIII (3), 2009
- [13] Jamiola D., Spaleniowa synteza kompozytów W-Re-Ni na rdzenie do pocisków przeciwpancernych, praca dyplomowa, WAT, 2009
- [14] Włodarczyk E., Michałowski J., Jackowski A., Piętaszewski J., Analiza parametrów materiałów i technologicznych determinujących właściwości spiekanych penetratorów

- z osnową wolframową, *Badania i Rozwój Nowych Materiałów Konstrukcyjnych oraz Podstaw Technologii Wytwarzania Uzbrojenia Wojskowego*, Materiały Konferencyjne, cz. I, 8/1-8/15, 1997
- [15] Cybula L., Nita Z., Właściwości stopów ciężkich na rdzenie pocisków podkalibrowych i dobór technologii wytwarzania, *Badania i Rozwój Systemu BM-21 oraz Nowoczesnej Amunicji Artyleryjskiej*, Materiały Konferencyjne, Kołobrzeg, 1999
- [16] Włodarczyk E., Michałowski J., Jackowski A., Piętaszewski J., Wpływ technologii wytwarzania penetratorów ze spieków ciężkich z osnową wolframową na wybrane efekty balistyki końcowej, *Naukowe Aspekty Techniki Uzbrojenia*, II Między Narodowa Konferencja Uzbrojenia, Materiały cz. III, str. 121-134, Waplewo, 1998
- [17] <http://directory-tungsten.blogspot.com/2012/08/military-tungsten-alloy-properties.html>
- [18] <http://www.tungstenchina.com/product/Tungsten-Heavy-Alloy-759.html>