



## Wybrane właściwości metalu ciężkiego 87W-7Ni-3Fe-3Re po młotowaniu na zimno

JAN PIĘTASZEWSKI, JERZY MICHAŁOWSKI,  
EDWARD WŁODARCZYK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki,  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących określenia niektórych właściwości metalu ciężkiego o składzie 87%W-7%Ni-3%Fe-3%Re, obrobionego plastycznie na zimno metodą kucia (młotowania) na kowarce rotacyjnej. Procesy młotowania spiekanych i obrobionych cieplnie prętów z powyższego metalu przeprowadzono, wprowadzając różny stopień zgniotu: 5; 10; 15; 20 i 23%. Nie stosowano wyżarzania międzyoperacyjnego (rekrystalizującego). Uzyskane i zaprezentowane wyniki badań wskazują, że niewielki dodatek renu do klasycznego metalu ciężkiego W-Ni-Fe i obróbka plastyczna istotnie wpłynęły na właściwości. Takie właściwości, jak  $R_e$ ,  $R_m$  oraz twardość wyraźnie wzrosły. Zmniejszyły się natomiast udarność i wydłużenie.

**Słowa kluczowe:** metale ciężkie WHA, wolfram, ren, obróbka plastyczna, rdzenie pocisków

**Symbole UKD:** 621.762

### 1. Wstęp

Jednym z głównych kierunków zastosowań militarnych metali ciężkich z osnową wolframową jest ich wykorzystanie do produkcji amunicji przeciwpancernej, to znaczy głównie na rdzenie pocisków podkalibrowych.

W wyniku procesów wytwórczych wymienionych metali techniką metalurgii proszków gotowe wyroby, najczęściej w postaci prętów walcowych, charakteryzują się unikatowymi i wysokimi właściwościami, wymienionymi w wielu źródłach literaturowych [1-16].

Gęstość wspomnianych metali zawiera się zazwyczaj w granicach  $16,5 \div 18,5 \text{ g/cm}^3$ . Granica plastyczności przy rozciąganiu kształtuje się na poziomie  $550 \div 790 \text{ MPa}$ . Wy-

trzymałość na rozciąganie osiąga wartości do 980 MPa. Plastyczność, określana miarą wydłużenia przy rozciąganiu, osiąga niekiedy 35%. W niektórych zastosowaniach, szczególnie gdy wymagana jest duża smukłość rdzeni L/D powyżej 30, właściwości powyższe, zwłaszcza  $R_e$  i  $R_m$ , są niewystarczające. Wówczas istnieje możliwość ich podwyższenia przez poddanie omawianych metali obróbce plastycznej.

Na temat obróbki plastycznej klasycznych metali ciężkich, takich jak np. W-Ni-Fe, istnieją informacje literaturowe [17-18]. Podawane są w nich ogólne dane o stosowanych metodach odkształcenia plastycznego oraz o wartościach osiągniętych właściwości po obróbce plastycznej. Nie natrafiono natomiast na informacje o obróbce plastycznej metali ciężkich z osnową wolframową, zawierających w swoim składzie dodatek renu.

Ren, podobnie jak wolfram, jest metalem ciężkim i wysokotopliwym. W jego procesie wytwórczym, jako metalu użytkowego, techniką metalurgii proszków lub stopów wolframu z renem stosowana jest powszechnie obróbka plastyczna. Z uwagi na zespół cech charakterystycznych renu, takich jak np. kruchość w podwyższonej temperaturze, czy wysoka skłonność do umocnienia wskutek odkształcenia plastycznego, istnieje wiele ograniczeń obejmujących warunki obróbki plastycznej metali z jego dodatkiem [19].

W Wojskowej Akademii Technicznej od 2004 roku w ramach Projektu Badawczego finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego realizowane są badania dotyczące wpływu zgniotu wywołanego obróbką plastyczną na właściwości metali ciężkich W-Ni-Fe zawierających dodatek renu.

Poprzednie publikacje związane z tą tematyką dotyczyły przeglądu bibliografii oraz badań wstępnych obróbki plastycznej powyższych materiałów [18, 20]. W niniejszym artykule przedstawiono niektóre wyniki badań na temat wpływu wielkości zgniotu w wyniku kucia na kowarce rotacyjnej (młotowanie), na wybrane właściwości metalu o składzie 87%W-7%Ni-3%Fe-3%Re. Istotną informacją jest to, że do wytworzenia metalu użyto jako źródło renu krajowy renian VII amonu, którego metodę otrzymywania opracowały i wdrożyły do produkcji IMN — Gliwice oraz KGHM — Lubin.

## 2. Przebieg i wyniki badań

Wymieniony wyżej metal, w postaci prętów o średnicy 11,0÷12,0 mm i długości 120÷130 mm, wytworzony przez prasowanie i spiekanie z fazą ciekłą, poddano przed procesem młotowania obróbce cieplnej zwanej przesycaaniem. W tabeli 1 przedstawiono charakterystyczne właściwości prętów przeznaczonych do młotowania.

TABELA 1

Wybrane właściwości prętów z metalu ciężkiego 87W-7Ni-3Fe-3Re po spiekaniu i przesycaaniu

Właściwości		Wartość
Gęstość	[g/cm <sup>3</sup> ]	17,14
Porowatość	[%]	0,29
Granica plastyczności przy rozciąganiu $R_e$	[MPa]	740
Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$	[MPa]	1020
Wydłużenie podczas rozciągania $A_5$	[%]	21,7
Udarność $K$	[J/cm <sup>2</sup> ]	89
Twardość HV5		323
Twardość ziaren (cząstek) osnowy W-Re w strukturze HV0,01		535
Twardość fazy wiążącej w strukturze HV0,01		317
Średnia wielkość ziarna (cząstki) osnowy w strukturze	[μm]	10,3

Przed procesami młotowania pręty obrobiono skrawaniem na jedną średnicę. Młotowanie prowadzono na kowarce rotacyjnej (młotkownicy), w temperaturze otoczenia, czyli na zimno, stopniując zmniejszanie średnicy początkowej. Poszczególne partie prętów młotowano bez stosowania wyżarzania rekrystalizującego (międzyoperacyjnego), z całkowitym zgniotem 5; 10; 15; 20 i 23%. Po procesach młotowania nie stwierdzono pęknięć lub wykruszeń w prętach. Nie stwierdzono również skręceń poosiowych ani zakrzywień prętów.

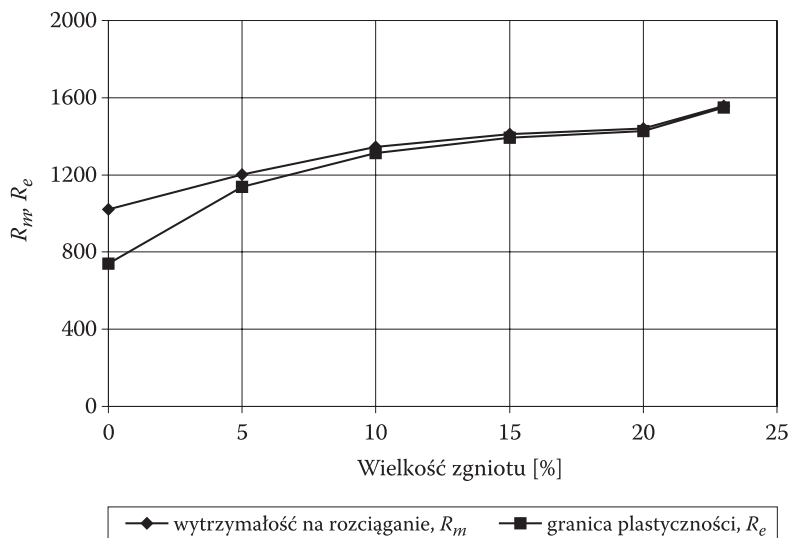
Obrobione plastycznie pręty poddano następnie wyżarzaniu w atmosferze argonu. Temperatura wyżarzania była równa 500°C, a czas wyżarzania wyniósł 1 h.

Pomiary właściwości mechanicznych, takich jak  $R_e$ ,  $R_m$ ,  $A_5$  i  $K$ , wykonano zgodnie z aktualnymi normami PN-EN, na próbkach wytworzonych obróbką skrawaniem, z uprzednio odkształconych plastycznie prętów. Wyniki pomiarów w funkcji wielkości zastosowanego zgniotu przedstawiono na rysunkach 1-3.

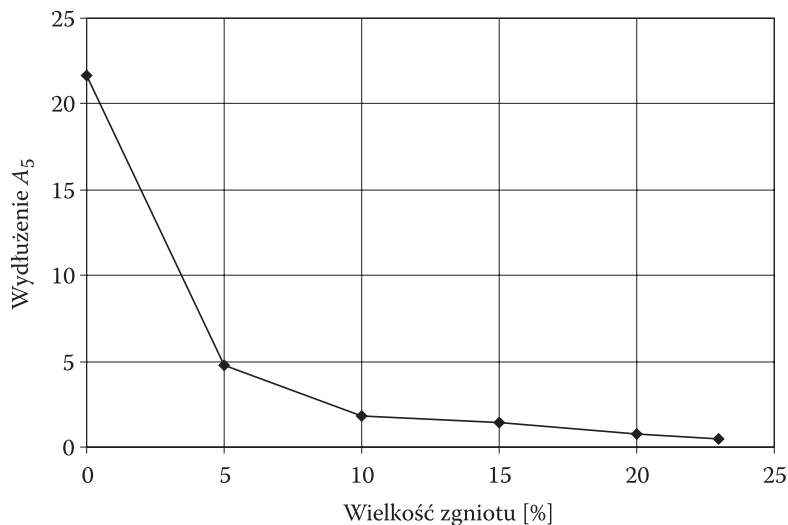
Przeprowadzono także pomiary twardości HV0,01 na szlifach próbek w przekroju wzdłużnym (zgodnym z kierunkiem młotowania) i w przekroju poprzecznym. Użyto do tego celu twardościomierza ZWICK z oprogramowaniem komputerowym i statystyczną analizą wyników badań. Określono twardość ziaren (cząstek) osnowy W-Re oraz twardość fazy wiążącej. Ponadto dokonano pomiarów:

- średniej równoważnej średnicy ziaren (cząstek) osnowy  $d$ ;
- maksymalnej cięciwy przekroju ziaren (cząstek) osnowy  $d_{\max}$ ;
- minimalnej cięciwy przekroju ziaren (cząstek) osnowy  $d_{\min}$ .

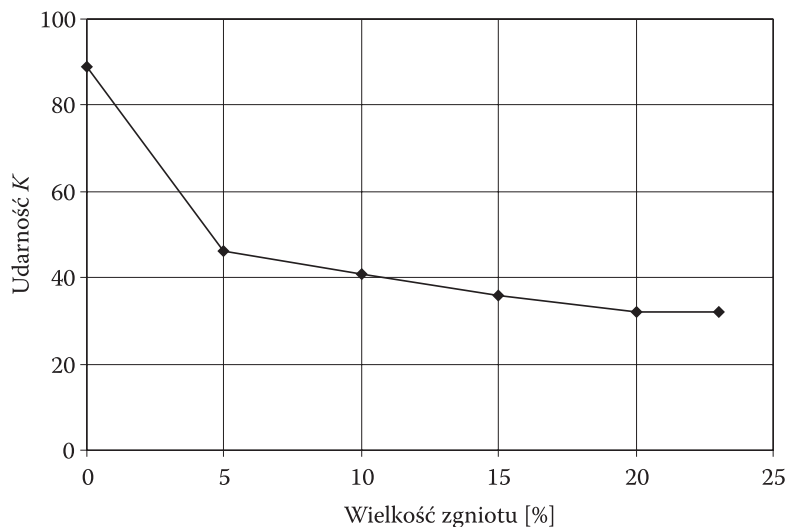
Na podstawie wykonanych pomiarów określono stosunek  $d_{\max}/d_{\min}$ , który przyjęto jako współczynnik wydłużenia (odkształcenia) ziaren osnowy. Wymienione pomiary elementów mikrostruktury metalu określono metodami metalografii ilościowej na stanowisku składającym się z: mikroskopu metalograficznego



Rys. 1. Granica plastyczności  $R_e$  i wytrzymałość  $R_m$  metalu ciężkiego 87W-7Ni-3Fe-3Re po młotowaniu na zimno z różnym zgniotem



Rys. 2. Wydłużenie  $A_5$  metalu ciężkiego 87W-7Ni-3Fe-3Re po młotowaniu na zimno z różnym zgniotem



Rys. 3. Udarność  $K$  metalu ciężkiego 87W-7Ni-3Fe-3Re po młotowaniu na zimno z różnym zgniotem

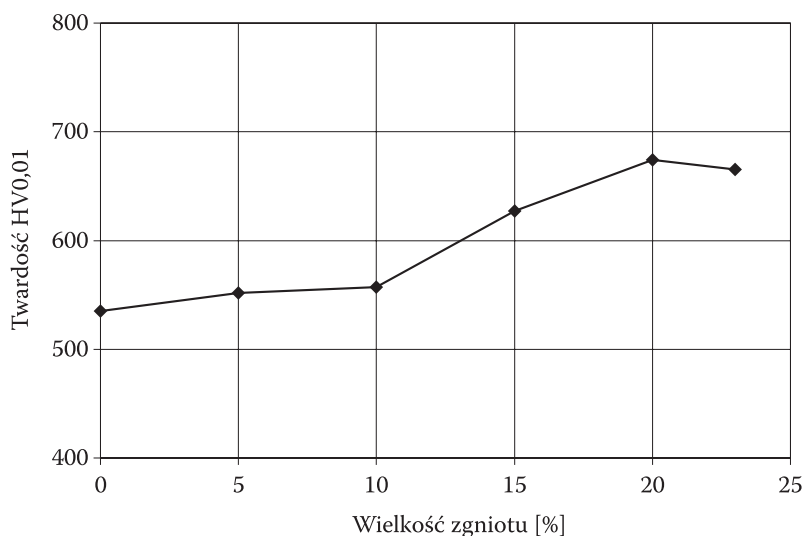
Neotophot 21, kamery Panasonic WVE 550, mikrokomputera klasy PC z kartą graficzną Matrox i oprogramowaniem Lucia 3.52.

Średnia równoważna średnica ziaren (cząstek) osnowy W-Re badanego metalu zawierała się w granicach od 10,012 do 14,731  $\mu\text{m}$ , dla całego zakresu zastosowanego zgniotu w procesie młotowania. Pozostałe wyniki pomiarów wymienionych wyżej cech mikrostruktury zamieszczono w tabeli 2.

TABELA 2

Niektóre charakterystyczne cechy struktury badanego metalu ciężkiego 87W-7Ni-3Fe-3Re, poddanego młotowaniu na zimno z różnym zgniotem

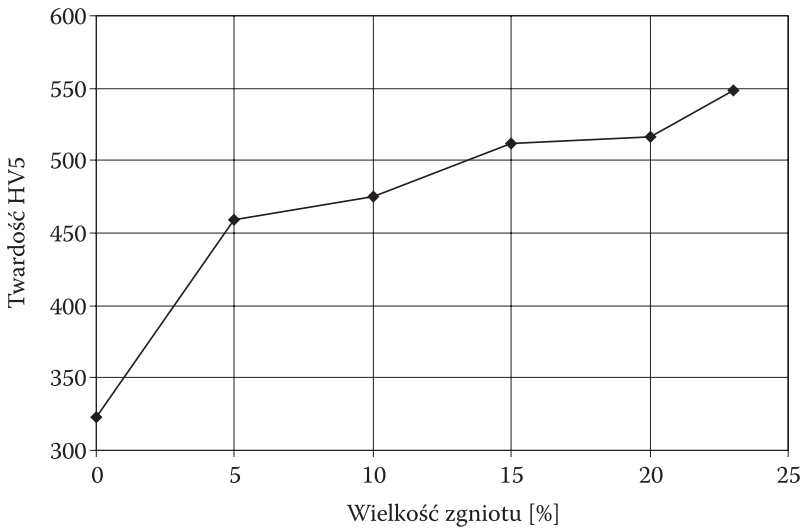
Zgniot [%]	Przekrój	Maksymalna cięciwa przekroju i minimalna ziaren (cząstek) osnowy W-Re		Współczynnik wydłużenia ziaren (cząstek) osnowy W-Re	
		$d_{max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$d_{min}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$d_{max}/d_{min}$	$d_{max}/d_{min}$ średni
0	wzdłużny poprzeczny	11,832 11,421	9,622 9,291	1,229 1,229	1,229
5	wzdłużny poprzeczny	15,538 17,465	10,993 11,994	1,418 1,456	1,437
10	wzdłużny poprzeczny	17,418 18,338	11,882 12,622	1,465 1,453	1,459
15	wzdłużny poprzeczny	18,792 18,461	12,960 12,644	1,450 1,460	1,455
20	wzdłużny poprzeczny	18,754 18,452	12,671 12,467	1,480 1,480	1,480
23	wzdłużny poprzeczny	18,322 17,947	12,171 12,052	1,505 1,489	1,497



Rys. 4. Twardość HV0,01 ziaren (cząstek) osnowy W-Re metalu ciężkiego 87W-7Ni-3Fe-3Re w przekroju wzdłużnym szlif metalograficznego, po młotowaniu na zimno z różnym stopniem zgniotu

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki pomiarów twardości HV0,01 ziaren (cząstek) osnowy metalu w przekroju wzdłużnym zglądu metalograficznego, w funkcji zgniotu zastosowanego w procesie młotowania. Twardość plastycznej fazy wiążącej w całym zakresie zgniotu była zbliżona i zawierała się w granicach 317,5 do 360,2 HV0,01.

Na kolejnym rysunku zaprezentowano natomiast wyniki pomiarów twardości HV5, także w przekroju wzdłużnym próbek młotowanych.



Rys. 5. Twardość HV5 mierzona w przekroju wzdłużnym, metalu ciężkiego 87W-7Ni-3Fe-3Re po młotowaniu na zimno z różnym zgniotem

### 3. Omówienie wyników badań

Otrzymane i powyżej przedstawione wyniki wskazują na kilka interesujących zjawisk, które są skutkiem obróbki plastycznej metalu ciężkiego o składzie 87W-7Ni-3Fe-3Re z różnym stopniem zgniotu.

Zwiększenie zgniotu podczas młotowania prętów doprowadziło do szybkiego wzrostu granicy plastyczności  $R_e$  i wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$ . Największy wzrost  $R_e$  w porównaniu do wartości po spiekaniu i przesycaniu przekroczył 100%. Maksymalna wartość  $R_m$  zwiększyła się o 51,7%. Poprawa powyższych właściwości łączy się ze zdecydowanym spadkiem wydłużenia przy rozciąganiu  $A_5$  (rys. 2) i z wysokim wzrostem twardości, przedstawionym na rysunkach 4 i 5. O możliwościach wykorzystania materiałów o takich właściwościach mogą świadczyć między innymi wyniki badań balistyki końcowej. Badania te są realizowane, a ich rezultaty zostaną przedstawione w kolejnych publikacjach.

Obserwując mikrostrukturę, stwierdzono interesujące zjawisko. Wzrost odkształcenia plastycznego spowodował znaczące powiększenie się twardości ziaren (cząstek) osnowy W-Re, podczas gdy twardość fazy wiążącej (stopu Ni-Fe-W-Re) nie uległa zasadniczo większym zmianom. Taki przebieg twardości osnowy i zdecydowane zmniejszenie się plastyczności metalu wskazuje, że dominujący składnik struktury, jakim jest osnowa, uległ znaczącemu umocnieniu. Potwierdzają to również wyniki pomiarów zamieszczone w tabeli 2. W zakresie zgniotów od 0 do 10% zaobserwowano wzrost zarówno maksymalnej, jak i minimalnej cięciwy przekroju ziaren (cząstek) osnowy. Po zastosowaniu wyższego zgniotu wydłużenie ziaren osnowy zostało wyraźnie spowolnione, potwierdzając tym samym wystąpienie ich umocnienia.

Jakkolwiek po młotowaniu z największym zgniotem równym 23% nie dostrzeżono pęknięć obrobionego plastycznie metalu, to jednak otrzymane wyniki mogą być sygnałem, że dalsza obróbka plastyczna na zimno będzie możliwa po zastosowaniu wyżarzania rekrytalizującego (międzyoperacyjnego). Wydaje się, że potwierdzeniem tej opinii jest zależność pomiędzy średnią wartością współczynnika wydłużenia ziaren osnowy i twardością HV0,01 tych ziaren.

Wynika z niej, że wartość współczynnika wydłużenia ziaren osnowy  $d_{\max}/d_{\min}$  ulega niewielkim zmianom w zakresie pomiędzy 1,459 i 1,497, co odpowiada zgniotom pomiędzy 10 i 23%, podczas gdy twardość ziaren osnowy wzrosła z 562,2 do 676,1, czyli o 113,9 jednostek.

#### 4. Wnioski

Podsumowując opisane i omówione wyniki badań, sformułowano następujące wnioski:

1. Obróbka plastyczna na zimno metodą młotowania metalu ciężkiego 87W-7Ni-3Fe-3Re, w zakresie wielkości zgniotu do 23%, spowodowała wyraźny wzrost granicy plastyczności  $R_e$ , wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  i twardości HV5 oraz spadek wydłużenia  $A_5$  i udarności  $K$ .
2. Zaobserwowany charakter powyższych zmian właściwości jest wynikiem nie tylko wprowadzonego odkształcenia plastycznego, ale także oddziaływania specyficznych cech renu i ich wpływu na osnowę wolframową badanego metalu.
3. Należy przypuszczać, że zastosowanie większego dodatku renu do metalu ciężkiego spowoduje ograniczenie wielkości zgniotu w procesie młotowania i konieczności zastosowania operacji wyżarzania rekrytalizującego.



Artykuł wpłynął do redakcji 29.03.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2006 r.

## LITERATURA

- [1] R. M. GERMAN, *Critical development in use heavy alloys*, Proceedings of the First International Conference on Tungsten and Tungsten Alloys, 15-18 November, 1992, Arlington, Virginia, USA, 3-13.
- [2] R. M. GERMAN, A. BOSE, S. S. MANI, *Sintering time and atmosphere influences on the microstructure and mechanical properties of tungsten heavy alloys*, Metallurgical Transactions, 23A, January, 1992, 211-218.
- [3] R. M. GERMAN, *Powder Metallurgy Science*, Metal Powder Industrial Federation, Princeton, New Jersey, USA, 1994.
- [4] Z. LUDYŃSKI, W. NOWAK, *Spieki ciężkie — technologia i właściwości*, Metalurgia Proszków, nr 2, 1995, 24-28.
- [5] Z. LUDYŃSKI, J. BUCKI, *Badania procesu spiekania wolframowych spieków ciężkich*, 14-th International Scientific Conference Advanced Materials, Technologies, Zakopane, maj 1996, 89-92.
- [6] Z. LUDYŃSKI, Z. NITA, *Podstawy technologii wytwarzania stopów ciężkich*, Mat. Konf. Cz. II, Badania i Rozwój Materiałów Konstrukcyjnych oraz Podstaw Technologii Wytrobów Uzbrojenia Wojskowego, Kołobrzeg, 21-22, kwiecień 1989, 15/1-15/11.
- [7] E. WŁODARCZYK, A. JACKOWSKI, J. MICHAŁOWSKI, J. PIĘTASZEWSKI, *Analiza parametrów materiałowych i technologicznych determinujących właściwości spiekanych penetratorów z osnową wolframową*, Biul. WAT, XLVII, nr 5, 1998, 63-78.
- [8] D. K. KIM, S. LEE, I. W. NOH, *Dynamic quasi-static torsional behaviour of tungsten heavy alloy specimens fabricated through sintering, heat-treatment, swaging and aging*, Materials Science and Engineering, A 247, 1998, 285-294.
- [9] W. A. ALLEN, J. W. ROGERS, *Penetration of rod into a semi-infinite target*, J. Franklin Inst. 1961, vol. 272, 275-284.
- [10] E. WŁODARCZYK, A. JACKOWSKI, J. MICHAŁOWSKI, J. PIĘTASZEWSKI, *Wpływ czasu mieszania proszków wolframu, niklu i żelaza na wybrane właściwości wytworzonych z nich spieków ciężkich*, Biul. WAT, XLVIII, 5, 1999, 87-98.
- [11] A. BOSE, R. M. GERMAN, *Sintering atmosphere effects on tensile properties of heavy alloys*, Metallurgical Transactions, 19A, October, 1998, 2467-2477.
- [12] M. C. HOGWOOD, *Precipitation at tungsten/tungsten interfaces in tungsten-nickel-iron heavy alloys*, Powder Metallurgy Science, vol. 29, no. 1, 1986.
- [13] A. BOSE, R. M. GERMAN, *Sintering atmosphere effects on tensile properties of heavy alloys*, Metallurgical Transactions A., vol. 19A, October 1988, 2467-2476.
- [14] R. M. GERMAN, *Sintering temperature effects on a tungsten heavy alloys*, The International Journal of Powder Metallurgy, vol. 24, no. 2, 1988, 115-118.
- [15] S. H. HONG, S. JOONG, *The reduction of the interfacial segregation of phosphorus and its embrittlement effects by lanthanum addition in a W-Ni-Fe heavy alloys*, Metallurgical Transactions A., vol. 22A, December 1991, 2969-2973.
- [16] J. J. BUCKI, M. KOZŁOWSKI, Z. LUDYŃSKI, A. MAZUR, *Study of hydrostatic extrusion of heavy alloys*, 14 International Plansee Seminar 97, May 12-16 1997, Reutte (Tyrol) Austria.

- [17] K. SIKORSKI, E. FORTUNA, K. J. KURZYDŁOWSKI, *Zmiany mikrostruktury i właściwości mechanicznych stopu W-Ni-Fe pod wpływem odkształcenia plastycznego i obróbki cieplnej*, „Inżynieria Materiałowa” nr 2 (127), XXII, marzec-kwiecień 2002, 46-52.
- [18] J. PIĘTASZEWSKI, J. MICHAŁOWSKI, E. WŁODARCZYK, *Obróbka plastyczna jako część procesów wytwarzania metali wysokotopliwych i metali ciężkich z osnową wolframową*, Biul. WAT, vol. LIV, 12, 2005.
- [19] Э. М. САВИЦКИЙ, Г. С. БУРХАНОВ, *Редкие металлы и сплавы физикохимический анализ и металловедение*, Изд. Наука, Москва, 1980.
- [20] J. PIĘTASZEWSKI, J. MICHAŁOWSKI, E. WŁODARCZYK, *Wpływ niektórych procesów obróbki plastycznej metali ciężkich 87W-7Ni-3Fe-3Re na ich wybrane właściwości*, (w druku) 2006.

J. PIĘTASZEWSKI, J. MICHAŁOWSKI, E. WŁODARCZYK

**Chosen properties of the 87W-7Ni-3Fe-3Re heavy alloy  
after cold plastic forming for hammering**

**Abstract.** In this paper, there have been presented investigation results of determination of some properties of the heavy alloy consisting of 87%W-7%Ni-3%Fe-3%Re. This alloy was obtained after cold plastic forming using hammering method with a rotational hammer. Processes of hammering of sintered and thermally treated rods of the alloy were carried out with various compressing degrees of: 5; 10; 15; 20 and 23%. Interoperational annealing (recrystallizing) has not been applied. Obtained and presented here results indicate that small addition of rhenium to the classical heavy alloy of the W-Ni-Fe type and plastic forming affected its properties. The properties like  $R_e$ ,  $R_m$  and hardness have distinctly increased. On the other hand, decrease in impact strength and rod elongation can be seen.

**Keywords:** tungsten, rhenium, heavy metals, WHA, plastic forming

**Universal decimal Classification:** 621.762