



## Badania spieku 77W-20Re-3Ni przeznaczonego na rdzenie pocisków przeciwpancernych

Tomasz MAJEWSKI<sup>\*1</sup>, Andrzej DĘBSKI<sup>1</sup>,  
Katarzyna LESZCZYŃSKA-SEJDA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna,  
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa*

<sup>2</sup>*Instytut Metali Nieżelaznych, 44-100, Gliwice, ul. Sowińskiego 5  
\* autor korespondencyjny, e-mail: tomasz.majewski@wat.edu.pl*

*Artykuł wpłynął do redakcji 04.07.2014. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 16.02.2015*

DOI: 10.5604/20815891.1185951

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań procesu wytwarzania i właściwości wolframowego spieku ciężkiego, przeznaczonego na rdzenie podkalibrowych pocisków przeciwpancernych. Badany materiał zawierał 77% wolframu, 20% renu oraz 3% niklu. Próbkę do badań wykonywano technologią metalurgii proszków. Zastosowano izostatyczne prasowanie mieszanki proszków i dwustopniowe spiekanie: wstępne – w atmosferze zdysocjowanego amoniaku i ostateczne – w próżni. W artykule zamieszczono schemat wytwarzania tego spieku i pokazano przykładowe obrazy jego mikrostruktury. W dalszej części zamieszczono wyniki analizy składu chemicznego w wybranych mikroobszarach badanego materiału oraz wybrane właściwości mechaniczne, takie jak wytrzymałość na ścislenie i twardość. Z otrzymanych spieków wykonano rdzenie do pocisków i umieszczano je w stalowym sabocie. Pokazano wyniki eksperymentów balistycznych dotyczących badania właściwości penetracyjnych w zakresie zastosowania tego spieku na rdzenie pocisków przeciwpancernych. Określono współczynnik penetracji, a także przedstawiono obrazy przekrojów rdzeni po strzelaniu.

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.

W oparciu o zdjęcia wykonane przy zastosowaniu skaningowego mikroskopu elektronowego opisano mikrostrukturę wybranych próbek. Ustalono, że procesowi penetracji towarzyszyło zjawisko samoostrzenia rdzenia.

**Słowa kluczowe:** inżynieria materiałowa, metalurgia proszków, wolfram, ren, spieki ciężkie

## 1. WSTĘP

Najważniejszą operacją występującą w procesie wytwarzania wolframowych spieków ciężkich jest spiekanie proszków z udziałem fazy ciekłej. Realizowana jest ona przeważnie w następujący sposób: na początku w atmosferze wodoru o niskiej wilgotności (temperatura punktu rosy:  $-20^{\circ}\text{C}$  lub poniżej), a następnie w wodrze o wyższej wilgotności (w ramach jednego procesu). Modyfikacją tej metody jest spiekanie w pierwszej fazie w „suchym” wodrze, a w końcowym etapie spiekania w próżni [1, 2].

W artykule opisano wyniki badań materiałów, których spiekanie wykonywane było dwuetapowo. Spiekanie wstępne wyprasek z fazą stałą odbywało się w atmosferze zdysocjowanego amoniaku. Spiekanie końcowe z fazą ciekłą realizowano w próżni [3]. Taki sposób spiekania jest bezpieczniejszy, a jakość wytwarzanych spieków jest zbliżona do jakości podobnych materiałów otrzymywanych przez spiekanie jednostopniowe [4].

W badanych materiałach jako jeden z dodatków stopowych zastosowano ren. Metal ten w stopach z wolframem powoduje: korzystne zmiany składu i postaci tlenków wolframu, przegrupowanie się tlenków, węglików i innych wtrąceń lub wydzielen w strukturze stopu, zmianę mechanizmu odkształcenia wolframu i skłonność do powstawania w jego strukturze bliźniaków odkształcenia, zwiększenie wytrzymałości oraz plastyczności stopów, podwyższenie temperatury rekrytalizacji wytworzonych stopów, poprawę ich odporności korozyjnej, spawalności i obrabialności, tworzenie pasm adiabatycznego ścinania w materiałach poddawanych obciążeniom dynamicznym [5, 6].

To oddziaływanie renu stwarza możliwość zastosowania takich spieków m.in. do wytwarzania rdzeni podkalibrowych pocisków przeciwpancernych [7].

Innym kierunkiem wykorzystania spieków wolframu z renem oraz spieków wolfram-ren-nikiel są niektóre rodzaje styków elektrycznych. W tym przypadku uważa się, że dodatek renu powinien zapewnić między innymi: wysokie właściwości mechaniczne (np. dużą twardość spieków), wysoką odporność na korozję w różnych środowiskach, wysoką odporność na erozję, spowodowaną działaniem łuku elektrycznego [8].

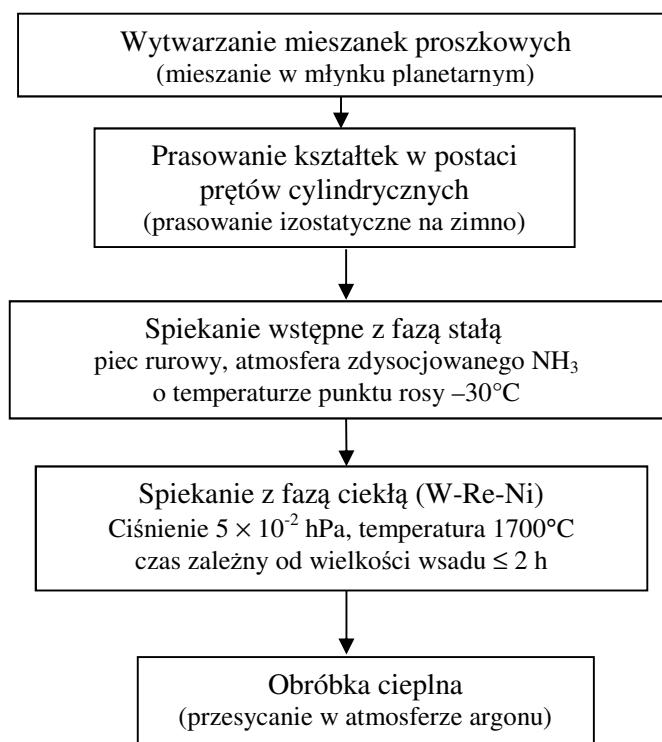
Artykuł niniejszy poświęcony jest opisowi metody wytwarzania spieku 77W-20Re-3Ni w ramach badań realizowanych w Wojskowej Akademii Technicznej i przedstawia wybrane właściwości otrzymanego materiału.

## 2. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK DO BADAŃ

Zastosowano następujące materiały wyjściowe do wytworzenia odpowiedniej mieszanki proszkowej: niepreparowany proszek wolframu o czystości 99,98% i średniej wielkości cząstek  $\sim 2,45 \mu\text{m}$ , zredukowany proszek renu o czystości powyżej 99,9% i średniej wielkości cząstek  $8,07 \mu\text{m}$  oraz proszek karbonylkowy niklu o czystości 99,89% i średniej wielkości cząstek  $\sim 5,8 \mu\text{m}$ .

Z wymienionych proszków wykonano mieszanek proszkową zawierającą 70% wolframu, 20% renu i 3% niklu (mas.).

Ogólny schemat wytwarzania spieków przedstawiono na rysunku 1. Spiekane materiały wytworzone według powyższego schematu poddano pomiarom porowatości, wytrzymałości na ścislenie oraz twardości, obserwacjom mikrostruktury oraz badaniom właściwości użytkowych, wyrażanych np. przez współczynnik penetracji, określany w wyniku testu strzelania do tarcz ze stali (o właściwościach zbliżonych do stali pancerniej) pociskami zawierającymi rdzenie wykonane z badanych materiałów.



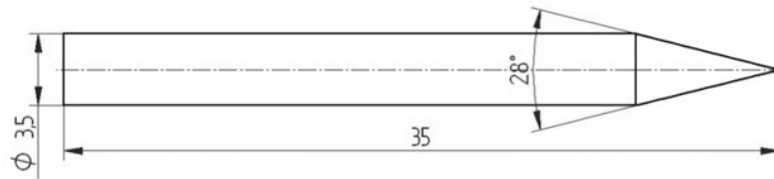
Rys. 1. Schemat procesu wytwarzania spieku ciężkiego W-Re-Ni

Fig. 1. Scheme for production of W-Re-Ni heavy metal

Badania współczynnika penetracji wykonano na stanowisku balistycznym, które znajduje się w Instytucie Techniki Uzbrojenia Wojskowej Akademii Technicznej. Rdzenie badawcze o wymiarach  $\Phi 3,5 \times 35$  mm umieszczano w sabotach ze stali NC10. Pociski wystrzelivano z prędkością  $\sim 1500$  m/s. Lufa w urządzeniu balistycznym miała kaliber 8,5 mm. Przegrody wykonano ze stali w gatunku 36HNM (36CrNiMo4-4-2) o twardości ok. 255 HB.

Współczynnik penetracji tarcz określony był jako iloraz głębokości wytworzonych kraterów do długości początkowej rdzeni badawczych.

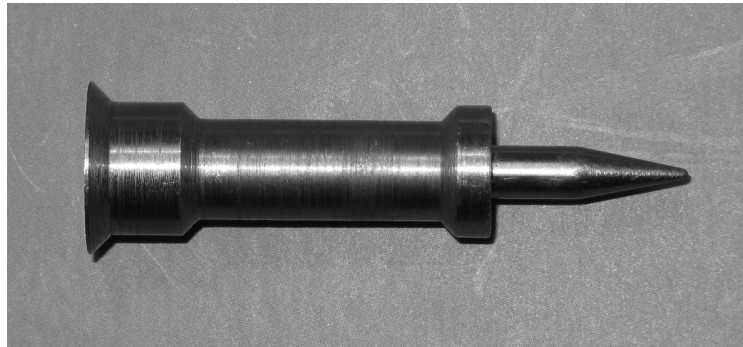
W zrealizowanych badaniach rdzenie pocisków doświadczalnych miały kształt pręta walcowego o smukłości  $l/d = 10$  zakończonym wierzchołkiem stożkowym. Kształt i wymiary rdzeni przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wymiary rdzeni pocisków doświadczalnych zastosowanych w badaniach

Fig. 2. The measurements of penetrators of the testing shell using in the investigation

Wymiary części wierzchołkowej rdzenia dobrano na podstawie wyników analiz, opublikowanych w pracach [9, 10]. Zdjęcie pocisku badawczego kal. 8,5 mm pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Zdjęcie pocisku badawczego kalibru 8,5 mm z rdzeniem wykonanym ze spieku W-Re-Ni

Fig. 3. Testing shell calibre 8.5 mm with penetrator made of W-Re-Ni heavy metal

Stanowisko przeznaczone do strzelania pociskami podkalibrowymi (rys. 4) wraz z urządzeniami zapewniającymi bezpieczeństwo obsługi składało się z pirotechnicznej wyrzutni pocisków, urządzenia do zdalnego odpalania oraz układu do pomiaru prędkości wylotowej pocisków.



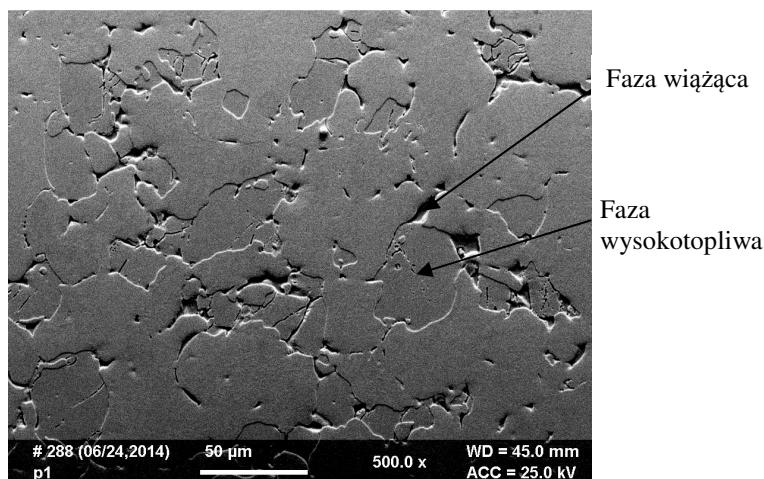
Rys. 4. Zdjęcie stanowiska badawczego do prób balistycznych

Fig. 4. The ballistic stand for shell shooting

### 3. WYNIKI BADAŃ

Przykładowy obraz mikrostruktury badanego spieku przedstawiono na rysunku 5. Na pokazanym zdjęciu występują duże cząstki fazy wysokotopliwej o nieregularnym kształcie. Można również zauważyć niewielki udział fazy wiążącej.

Mikrostruktura spieku 77W-20Re-3Ni różni się wyraźnie od mikrostruktury klasycznego spieku W-Ni-Fe. W tym przypadku duży dodatek renu powoduje zmniejszenie udziału fazy wiążącej w takim stopniu, że w obrazie mikrostruktury występują głównie połączone ziarna fazy wysokotopliwej. Efekt ten jest wynikiem zwiększonej rozpuszczalności niklu w roztworze W-Re wraz ze wzrostem zawartości renu.



Rys. 5. Mikrostruktura spieku 77W-20Re-3Ni, pow. 500x

Fig. 5. The microstructure of 77W-20Re-3Ni sinter (magn. 500x)

W celu określenia składu chemicznego zaobserwowanych elementów mikrostruktury wykonano badania zawartości udziału pierwiastków w wybranych mikroobszarach. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Udział procentowy pierwiastków w spieku 77W-20Re-3Ni (mas.)

Table 1. The percentage share of elements in the 77W-20Re-3Ni sinter (mass)

Faza wiążąca			Fazy wysokotopliwe		
W	Re	Ni	W	Re	Ni
34,9	10	55,1	79,8	18,1	1,7
			60,7	33,1	6,2

Fazę wiążącą stanowi roztwór W i Re w Ni. Wykazano występowanie cząstek fazy wysokotopliwej o dwóch znacznie różniących się udziałach procentowych pierwiastków (cząstki te zawierają np. ok. 80 lub 60% wolframu).

Wyniki pomiarów właściwości mechanicznych, wartości porowatości i wartości przebijalności przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wybrane właściwości spieku 77W-20Re-3Ni

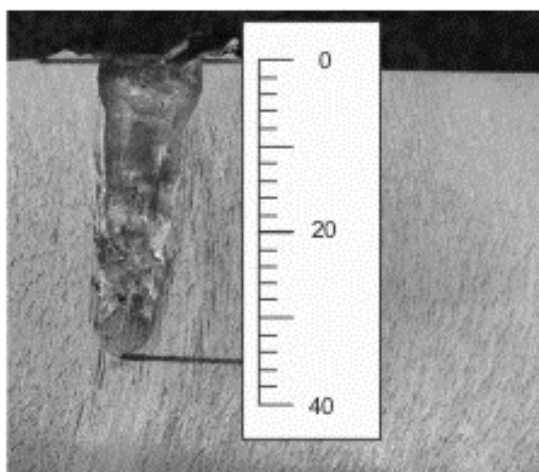
Table 2. Selected properties of 77W-20Re-3Ni sinter

Wytrzymałość na ściskanie $R_c$ [MPa]	Twardość HV5	Porowatość [%]	Współczynnik penetracji
2310	767	1,89	0,98

Badania porównawcze wykazały, że otrzymane spieki charakteryzują się wyższą twardością i wytrzymałością na ściskanie, a jednocześnie większą porowatością niż klasyczne spieki ciężkie (W-Ni-Fe). Jednak porowatość ta nie przekracza 2%.

Badania właściwości penetracyjnych wykazały, że spiek 77W-20Re-3Ni charakteryzuje się dużą wartością współczynnika penetracji równą 0,98. Wartość tego parametru jest wyraźnie większa od tej, jaką uzyskiwano w przypadku tradycyjnych spieków W-Ni-Fe.

Na rysunku 6 pokazano przykładowy krater powstały w wyniku uderzenia w tarczę.



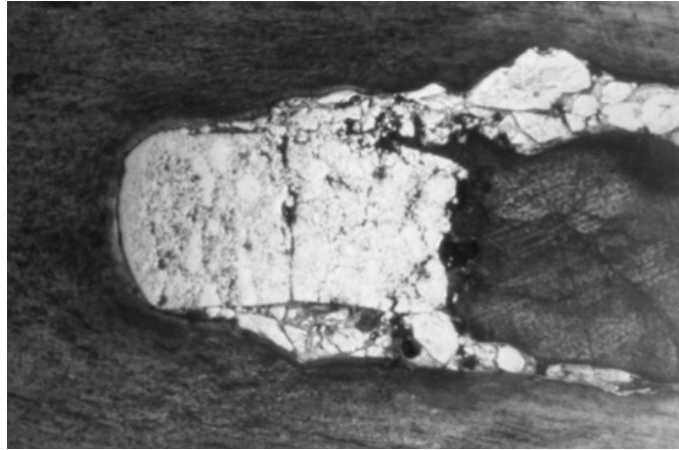
Rys. 6. Przykładowy obraz przebiccia tarczy rdzeniem badawczym

Fig. 6. The exemplary section of a crater produced during penetration by the research penetrator

Na rysunku 7, przedstawiającym fragment rdzenia po penetracji pancerza, można zaobserwować efekt samoostrzenia rdzenia. Z punktu widzenia zdolności penetracyjnych jest to zjawisko bardzo korzystne w przypadku zastosowania spieku W-Re-Ni na rdzenie pocisków przeciwpancernych,

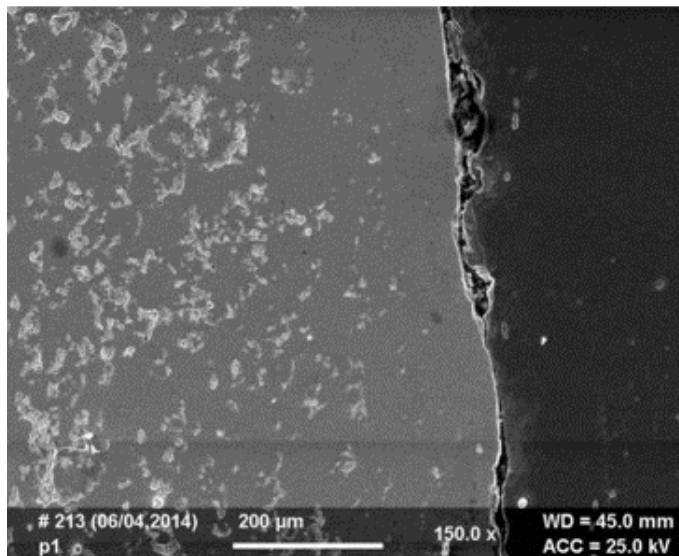
ponieważ ogranicza proces powiększania się przekroju rdzenia i pozwala mu zachować zaostrowany wierzchołek.

We wszystkich badanych przypadkach można było zauważyć, że w trakcie penetracji pancerzy wierzchołki rdzeni uległy wyostrzeniu, a popękane ich fragmenty zajęły obszary na zewnątrz powierzchni rdzenia.



Rys. 7. Zdjęcie części wierzchołkowej krateru z fragmentami rdzenia, pow. 20x

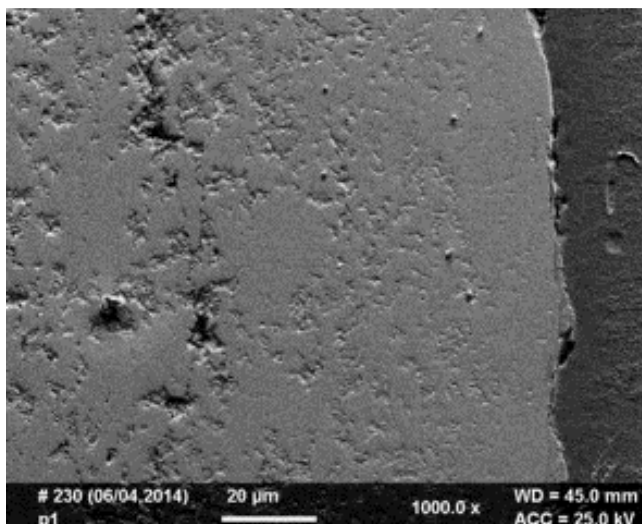
Fig. 7. The picture of front part of the crater with the fragments of penetrator (magn. 20x)



Rys. 8. Zdjęcie części wierzchołkowej rdzenia, pow. 150x

Fig. 8. The picture of front part of the penetrator (magn. 150x)





Rys. 9. Zdjęcie części wierzchołkowej rdzenia, pow. 1000x

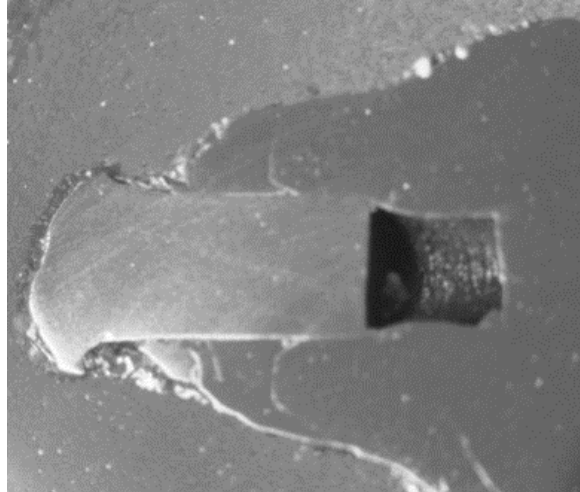
Fig. 9. The picture of front part of the penetrator (magn. 1000x)

Z kolei na rysunkach 8 i 9 pokazano obrazy mikrostruktury obszarów rdzenia w pobliżu ich powierzchni stożkowej, która brała bezpośredni udział w penetracji pancerza. Zaobserwowano, że w warstwie wierzchniej rdzenia o grubości ok. 30-40  $\mu\text{m}$  mikrostruktura materiału jest nieco inna w porównaniu do miejsc położonych głębiej. Przede wszystkim nie widać w tej warstwie obszarów fazy wiążącej, tak charakterystycznych dla spieków ciężkich spiekanych z udziałem fazy ciekłej.

Można przypuszczać, że w wyniku silnego nagrzewania się warstwy wierzchniej rdzenia w trakcie penetracji pancerza mogła nastąpić dyfuzja fazy ciekłej (której w tym spieku jest stosunkowo mało) do fazy wysokotopliwej. Jednak dla potwierdzenia tej hipotezy należy jeszcze wykonać badania składu chemicznego i fazowego tych obszarów.

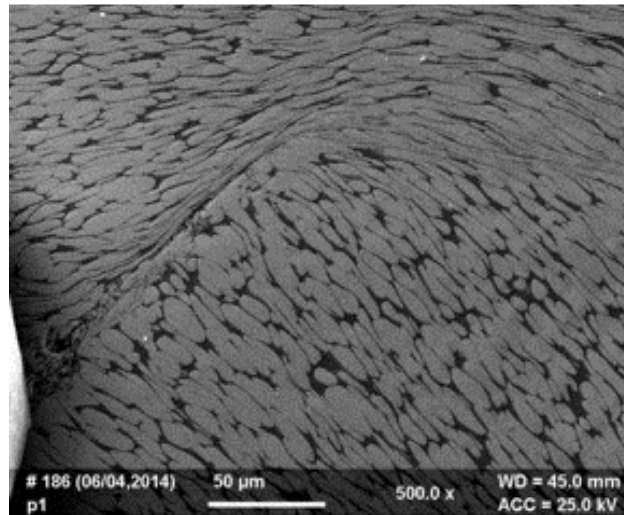
W celu wykazania specyfiki zjawisk towarzyszących penetracji pancerza przez rdzenie wykonane ze spieku W-Re-Ni, pokazano wyniki wcześniej przeprowadzonych badań dotyczących klasycznego spieku ciężkiego 90W-7Ni-3Fe, wykorzystywanego powszechnie do wytwarzania rdzeni pocisków przeciwpancernych. Na rysunku 10 umieszczono obraz przekroju rdzenia po próbie strzelania, a na rysunku 11 – mikrostrukturę obszaru położonego blisko czołowej części rdzenia.

Jak widać, w przypadku tego materiału nastąpiło wyraźne zwiększenie średnicy rdzenia w jego części wierzchołkowej, czyli tzw. grzybkowanie. Zjawisko to powoduje zwiększenie przekroju, a co za tym idzie zmniejszenie ciśnienia działającego ze strony rdzenia na pancerz, a więc zmniejsza jego właściwości penetracyjne.



Rys. 10. Przykładowy widok rdzenia ze spieku W-Ni-Fe wraz z fragmentem sabotu

Fig. 10. The exemplary picture of the penetrator made of W-Ni-Fe sinter with the fragments of the sabot



Rys. 11. Mikrostruktura spieku 90W-7Ni-3Fe, pow. 500x

Fig. 11. The microstructure picture of 90W-7Ni-3Fe sinter (magn. 500x)

Podczas penetracji pancerza materiał rdzenia uległ znacznemu odkształceniu plastycznemu, które widoczne jest w postaci silnie zlokalizowanych pasm odkształcenia o grubości kilku  $\mu\text{m}$ . Odkształcenie materiału występowało głównie poprzez płynięcie fazy wiążącej. Otoczone fazą wiążącą cząstki fazy wysokotopliwej rdzenia przybrały kształt wydłużony, równoległy do kierunku pasma odkształcenia. W tym przypadku nie zaobserwowano zjawiska samoostrzenia, jednak pasma odkształcenia przy większych prędkościach deformacji mogą stać się źródłem powstawania pęknięć.

#### 4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że otrzymany materiał charakteryzuje się (w stosunku do innych wolframowych spieków ciężkich) dość wysokimi parametrami wytrzymałościowymi. Zastosowanie renu, jako dodatku stopowego w spiekach W-Re-Ni, powoduje znaczne zwiększenie twardości tych materiałów (co wynika również ze zmniejszonego udziału plastycznej fazy wiążącej).

Analiza wyników penetracji pancerzy wykazała, że głębokość otrzymanych kraterów w przegrodach jest bliska długości początkowej rdzeni. Średnia wartość współczynnika penetracji wynosi 0,98. Zaobserwowano zjawisko samoostrzenia rdzeni, które z reguły nie występuje w spiekach z większym udziałem fazy wiążącej. Należy również zwrócić uwagę, że wysokie właściwości badanych spieków uzyskano bez zastosowania obróbki plastycznej.

Przedstawiony opis metody wytwarzania spieków ciężkich W-Re-Ni oraz zaprezentowane niektóre właściwości tych materiałów stanowią wstępny etap szerokiego programu badawczego. W trakcie realizacji całego programu planowane jest zastosowanie do produkcji spieków ciężkich nowych związków renu i wolframu, takich jak np. reniany, amoniakaty oraz wolframiany (niklu i kobaltu). Sposób wytwarzania renianu niklu, a także proces otrzymywania z niego proszku stopowego Re-Ni są chronione patentami [11, 12].

*Artykuł zawiera wyniki pracy finansowanej przez NCBiR ze środków na naukę w latach 2013-2015 jako projekt nr PBS1/B5/19/2012.*

**LITERATURA**

- [1] Ludyński Z., Nowak W., Spieki ciężkie – technologia i właściwości, *Metalurgia Proszków*, nr 2, s. 24-28, 1995.
- [2] German R.M., Critical development in use heavy alloys, *Proceedings of the First International Conference on Tungsten and Tungsten Alloys*, Arlington, Virginia, 1992.
- [3] Majewski T., Michałowski J., Piętaszewski J., Metody wytwarzania i właściwości metali ciężkich W–Ni–Fe–Re, *Inżynieria Materiałowa*, nr 2 (162), 2008.
- [4] Zurek A.K., Gray G.T., Dynamic strength and strain rate effects on fracture behaviour of tungsten and tungsten alloys, *Proceedings of the 3rd Conference on Mechanical and Physical Behavior of Materials under Dynamic Loading*, Strasbourg, 1991.
- [5] Gornostyrjew J.N., Kocnelson M.I., Trefilow A.B., Sobirianow P.F., K woprosu o priborie rienijewowo effiekta. Wlijanije renija nastojcziwost karbidow i rastworimost primiesiej wniedrienija w spławach W-Re, *Fizika Metalłow i Metalłwedienije*, 11, s. 5-16, 1992.
- [6] Gornastyrev Y.N., Kocnelson M.I., Peschanskikh G.V., Trefilov A.V., On the nature of the rhenium effect. Peculiarities of the bane structure and elastic moduli of W – and Mo – based alloys, *Phys. Stat. Sol. (b)*, 164, s. 185-191, 1991.
- [7] Tham R.H., Nahme H., Dynamic behaviour of tungsten-rhenium-alloys, *Proceedings of the First International Conference on Tungsten and Tungsten Alloys*, Arlington, Virginia, 1992.
- [8] Woch M., Missol W., Lis M., Książek S., Badania IMN nad wykorzystaniem renu w przetwórstwie metali nieżelaznych, *Materiały konferencyjne z II Konferencji Międzynarodowej „Metale towarzyszące w przemyśle metali nieżelaznych”*, Wrocław, 13-15 października 2010 r.
- [9] Koperski W., Michałowski M., *Opracowanie nowoczesnych spiekanych pocisków amunicji strzeleckiej i zbadanie ich właściwości balistycznych*, rozprawa doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2005.
- [10] Jones S.E., Rule W.K., On the optimal nose geometry for a rigid penetrator including the effects of pressure – dependent friction, *International Journal of Impact Engineering*, 24, s. 403-415, 2000.
- [11] Leszczyńska-Sejda K., Benke G., Majewski T., Michałowski J., Piętaszewski J. i in., *Sposób produkcji bezwodnego renianu(VII) niklu(II)*, patent nr PL 209878, z dn. 30 października 2011 r.
- [12] Majewski T., Michałowski J., Piętaszewski J., Benke G., Leszczyńska-Sejda K., *Sposób wytwarzania proszku stopowego ren-nikiel*, patent PL 211592 z dn. 29 czerwca 2012 r.

## **Investigation of 77W-20Re-3Ni Sinter Designed for Cores of Armour-Piercing Projectiles**

Tomasz MAJEWSKI, Andrzej DĘBSKI,  
Katarzyna LESZCZYŃSKA-SEJDA

**Abstract.** The results of investigation of production process and properties of W-Re-Ni sinters intended for cores of anti-tank missiles were presented in the paper. The tested material contained 77% of tungsten, 20% of rhenium and 3% of nickel. The test specimens were made by powder metallurgy. The production process consisted of powder mixture pressing by CIP method and two-stage sintering: initial – in an atmosphere of dissociated ammonia and final – in vacuum. The diagram of the production process of this sinter and exemplary picture of its microstructure were shown in the paper. The results of the analysis of the chemical composition of selected microregions examined materials, and selected mechanical properties such as compressive strength and hardness were presented in the next part of the paper. The cores of the projectiles, which were made from the examined materials, were put in a steel sabot. The results of experiments connected with investigation of the penetration properties in the field of using this sinter as the cores of anti-tank shells were shown. The penetration coefficient was determined, and moreover cross-sectional images of the cores after shooting were presented. Based on the photographs taken using a scanning electron microscope the microstructure of selected samples was described. It was settled that the cores selfsharpening phenomenon was appeared during penetration.

**Keywords:** materials engineering, powder metallurgy, tungsten, rhenium, heavy alloys

