

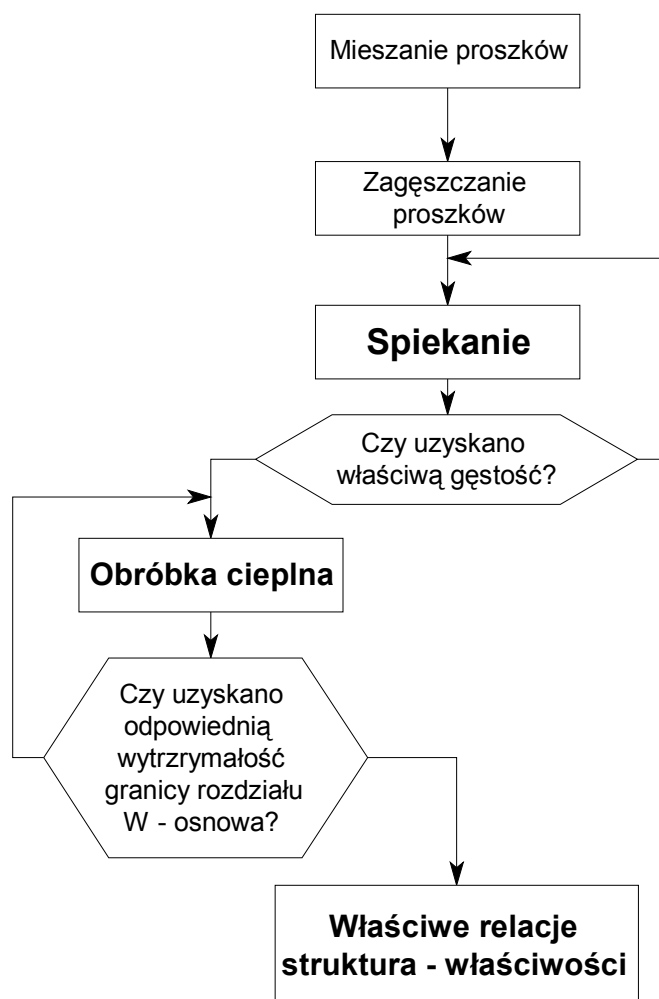
BADANIA NAD WYTWARZANIEM RDZENI PODKALIBROWYCH POCISKÓW PRZECIWPANCERNYCH KALIBER 120MM

W artykule przedstawiono badania nad opracowaniem metody wytwarzania wolframowych stopów ciężkich przeznaczonych na rdzenie pocisków przeciwpancernych kaliber 120mm. Punktem wyjścia były założenia odnośnie do wymiarów oraz własności mechanicznych, jakie powinien spełniać materiał. Opisano sposób wytwarzania stopów i wyniki kolejnych prób, na podstawie których dokonywano wyboru parametrów procesu wytwarzania. W szczególności zamieszczono wyniki badań własności mechanicznych i struktury, otrzymane w poszczególnych etapach pracy.

1. Wprowadzenie

Wolframowe stopy ciężkie znajdują szereg zastosowań w różnych obszarach działalności ludzkiej. Służą między innymi do wytwarzania ekranów promieniowania, wypierając sukcesywnie mniej ekologiczne ekrany z ołowiu, pojemników na materiały radioaktywne, przeciwwagi w maszynach budowlanych czy wreszcie elementy rzutek, (ang. darts) [1-3]. Nie ulega wątpliwości jednak, że największe zastosowanie stopów wolframu to rdzenie pocisków, a powodem jest bardzo duża gęstość stopów wolframu często przewyższająca 18Mg/m^3 . Stopy te zawierają od 80 do 98% mas. wolframu, a ich mikrostruktura składa się z ziaren wolframu o geometrii sferycznej o wielkości $30\text{-}50\mu\text{m}$ rozmieszczonych równomiernie w osnowie, która jest najczęściej stopem W-Ni-Fe, w którym stosunek Ni : Fe ma się jak 7 : 3. Ze względu na tę właśnie mikrostrukturę wolframowe stopy ciężkie (WSC) są często nazywane kompozytami wolframowymi. Jak „przystało” na kompozyt, jego składniki różnią się istotnie między sobą właściwościami, a jedną z głównych różnic, poza gęstością, jest moduł Younga wynoszący 400 i 200GPa, odpowiednio dla wolframu i niklu, z których ostatni jest głównym składnikiem osnowy. Kompozyty wolframowe wytwarza się metodą metalurgii proszków, której schemat pokazano na rys.1. Jednym z najistotniejszych etapów wytwarzania WSC jest spiekanie, ponieważ to właśnie od niego w największym stopniu zależą własności użytkowe kompozytu. Późniejsze zabiegi, choć nie mniej ważne, często nie są w stanie usunąć wad powstałych na etapie spiekania. Generalnie jednak o własnościach mechanicznych wolframowych stopów ciężkich decyduje wytrzymałość granicy międzyfazowej wolfram – osnowa. Dzięki znacznej plastyczności osnowy, którą stanowi roztwór na osnowie Ni o sieci krystalograficznej FCC, kompozyty wolframowe mogą być obrabiane plastycznie

przez zgniot, dzięki czemu jest możliwe dalsze zwiększenie ich własności mechanicznych, głównie wytrzymałościowych.



Rys.1. Schemat procesu wytwarzania kompozytów wolframowych [4]

Niniejsza praca została podjęta w związku z zaistnieniem zapotrzebowania krajowego przemysłu obronnego na rdzenie pocisków kaliber 120mm, które, oprócz określonych gabarytów, miały spełniać następujące wymagania:

2. Metodyka badań

Pierwszym etapem pracy było wprowadzenie zmian do opracowanej wcześniej metody wytwarzania celem uzyskania kompozytów wolframowych, które obok określonej geometrii, musiały spełniać następujące wymagania:

- a - wytrzymałość na rozciąganie $R_m^{\min} = 1300\text{MPa}$,
- b - umowna granica plastyczności $R_{p,0.2}^{\min} = 1200\text{MPa}$,
- c - wydłużenie względne $A_5^{\min} = 6\%$,
- d - udarność wyznaczana metodą Charpy'ego:
 - w temperaturze 20°C $U_{20}^{\min} = 110\text{J/cm}^2$,
 - w temperaturze -40°C $U_{-40}^{\min} = 80\text{J/cm}^2$,
- e - twardość Rockwella w skali C $\text{HRC}^{\min} = 38\text{HRC}$.

W związku z powyższym konieczne było wykonanie obszernych badań wstępnych, których wyniki umożliwiłyby dobór optymalnych parametrów procesu technologicznego. Badania te obejmowały w szczególności:

1. Wykonanie badań wpływu parametrów obróbki cieplnej (przesycania) na wytrzymałość, wydłużenie, twardość, udarność stopu.
2. Przeprowadzenie badań możliwości kształtowania stopu metodą obróbki plastycznej po uprzedniej obróbce cieplnej.
3. Przeprowadzenie badań własności kompozytów wolframowych po obróbce plastycznej metodą kucia.
4. Wykonanie badań wpływu obróbki cieplnej po kuciu na własności mechaniczne wolframowych stopów ciężkich.
5. Przeprowadzenie oceny mikrostruktury stopów na różnych etapach procesu technologicznego na podstawie obserwacji metalograficznych.
6. Wykonanie badań fraktograficznych w skaningowym mikroskopie elektronowym, (SEM) celem określenia charakteru pęknięcia stopów wolframu.
7. Dokonanie wrywkowych badań składu fazowego w mikroobszarach za pomocą mikrosondy elektronowej.

Stopy sporządzono ze składników wysokiej czystości, których charakterystykę podano w pracy [5]. Po odważeniu odpowiednich ilości poszczególnych składników, proszki mieszano 20 godzin w mieszalniku bębnowym, a następnie zagęszczono na prasie kątowej w postaci kształtek o średnicy ok. 50mm i długości ok. 480mm. Kształtki spiekano przez 20 minut w piecu wodorowym w temperaturze ok. 1520°C, uzyskując pręty o średnicy ok. 31mm i długości ok. 450mm.

Pręty podane zostały poddane obróbce cieplnej przesycania w dwóch wariantach:

- wygrzewania w próżni w temperaturze 1000°C i szybkiego chłodzenia w wodzie,
- wygrzewania w temperaturze 1200°C i szybkiego chłodzenia w strumieniu azotu.

Następnym etapem była obróbka plastyczna metodą kucia na zimno na średnicę ok. 26 i 27mm i długość 630 oraz 585mm. Ostatnim etapem procesu wytwarzania był obróbka cieplna obejmująca starzenie przez czas od 8 do 20 godzin w temperaturze 200 – 250°C.

We wszystkich badaniach gęstość kompozytu wolframowego wynosiła 17.2-17.3Mg/m³.

3. Wyniki badań

3.1. Badania laboratoryjne

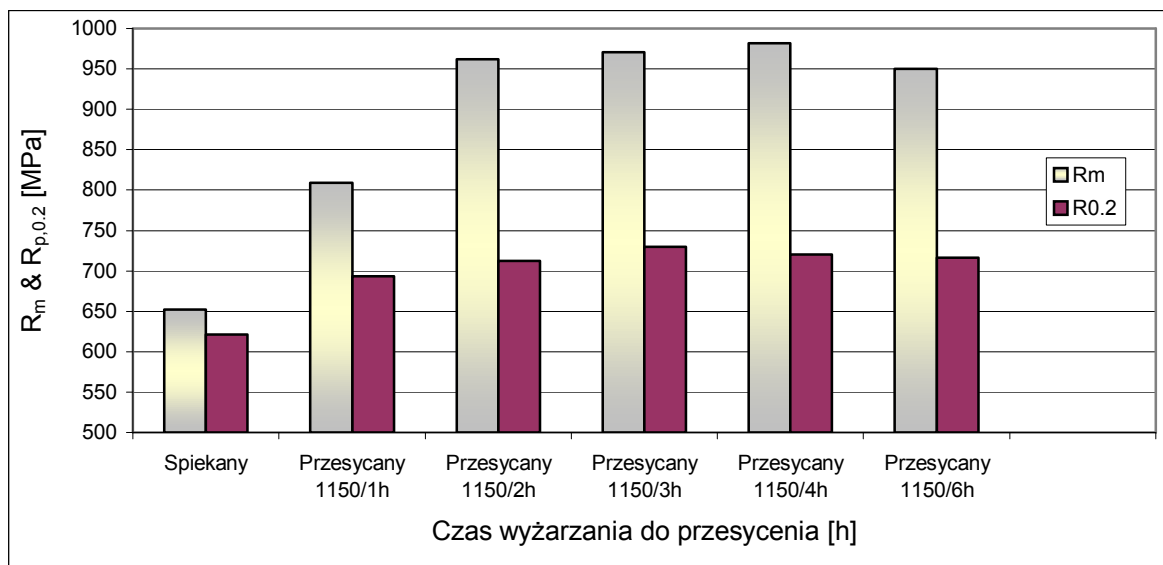
Wstępnym etapem pracy były badania na próbkach w postaci prętów o średnicy obliczeniowej 16.3mm. a następnie kutech na średnicę 14mm.

Badania laboratoryjne przeprowadzono na stopach wolframu w postaci prętów w celu określenia parametrów procesu technologicznego. Obejmowały one operacje prasowania mieszanki, spiekania w temperaturze 1520°C, a następnie przesycania, kucia i starzenia z zastosowaniem różnych temperatur i czasów. Na tej podstawie dokonano wyboru parametrów procesu, które później wykorzystano do wykonania prętów z kompozytów wolframowych przeznaczonych na rdzenie podkalibrowych pocisków przeciwpancernych, kaliber 120mm.

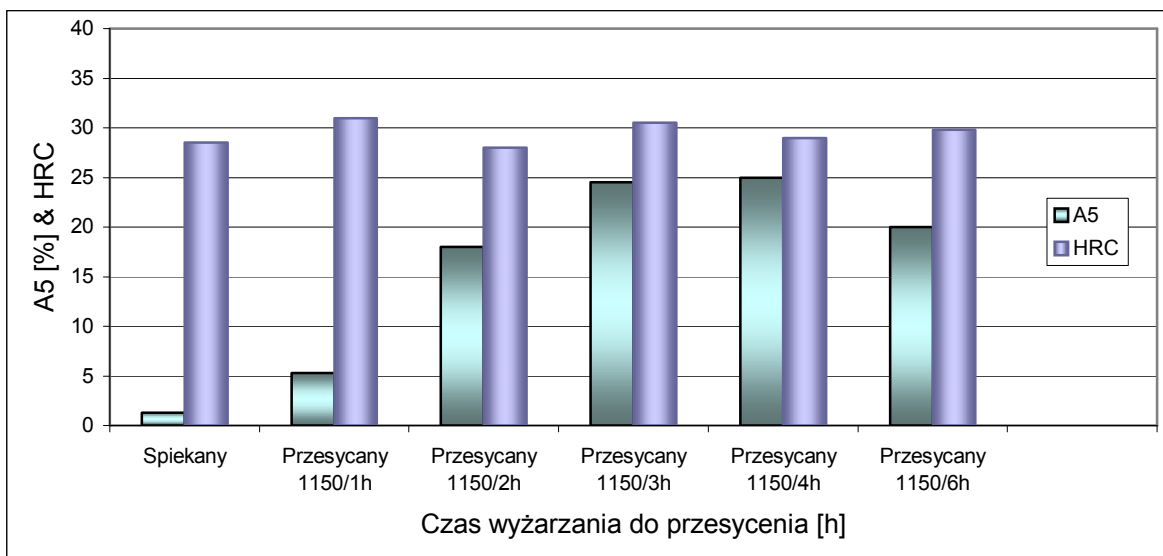
3.1.1. Wyniki badań własności mechanicznych

Badania własności mechanicznych wykonano na maszynie wytrzymałościowej Intron-1115 przy szybkości przesuwu trawersy 1mm/min. Ich celem było wyznaczenie podstawowych własności mechanicznych, a więc wytrzymałości na rozciąganie – R_m , umownej granicy plastyczności $R_{p,0.2}$ oraz wydłużenia względnego A_5 . Wyniki badań przedstawiono postaci wykresów.

Z wykresu (rys.1) widać, że największą wytrzymałość na rozciąganie oraz umowną granicę plastyczności uzyskują stopy po 2 – 4 godzinnym wyżarzaniu w próżni przed przesycaniem. Podobny przebieg obserwuje się w wypadku zmian twardości HRC i wydłużenia, które również wykazują wartości maksymalne dla czasu wyżarzania w zakresie 3 – 4 godziny (rys.2).

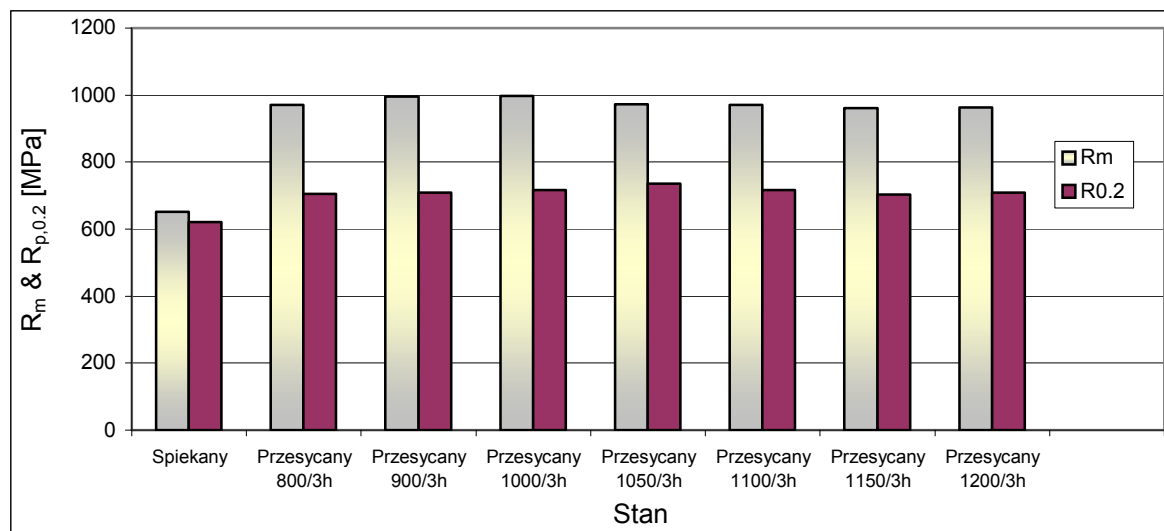


Rys.1. Zmiany wytrzymałości na rozciąganie R_m i umownej granicy plastyczności $R_{p,0.2}$ pręta PR20 o gęstości 17.2 Mg/m^3 w funkcji czasu wyżarzania w temperaturze 1150°C do przesycania

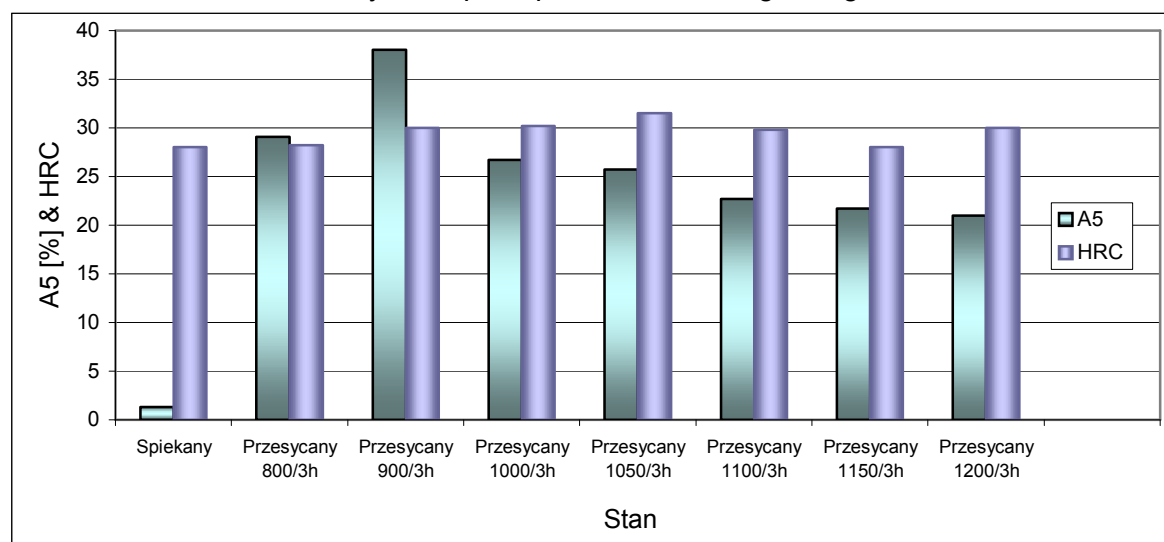


Rys.2. Zmiany wydłużenia A_5 oraz twardości HRC pręta PR20 o gęstości 17.2 Mg/m^3 w funkcji czasu wyżarzania w temperaturze 1150°C do przesycania

Na rys.3 i 4 zamieszczono wartości R_m , $R_{p,0.2}$ (rys.3) oraz A_5 i twardości HRC (rys.4) po 3h wyżarzaniu w różnej temperaturze do przesycania, zmieniającej się w zakresie od 800 do 1200°C. Z pierwszego wykresu wynika, iż wytrzymałość na rozciąganie jak i umowna granica plastyczności nie zmienia się istotnie w badanym zakresie temperatury, tym niemniej niewielkie maksimum rysuje się w obszarze $T = 900 - 1000^\circ\text{C}$. Podobne wnioski można sformułować odnośnie do twardości i wydłużenia (rys.4), z których wynika, że maksymalne wydłużenie występuje dla czasu $t = 3\text{h}$ w temperaturze 900°C . Twardość HRC utrzymuje się na mniej więcej tym samym poziomie, praktycznie niezależnie od temperatury wyżarzania do przesycania (rys.4).

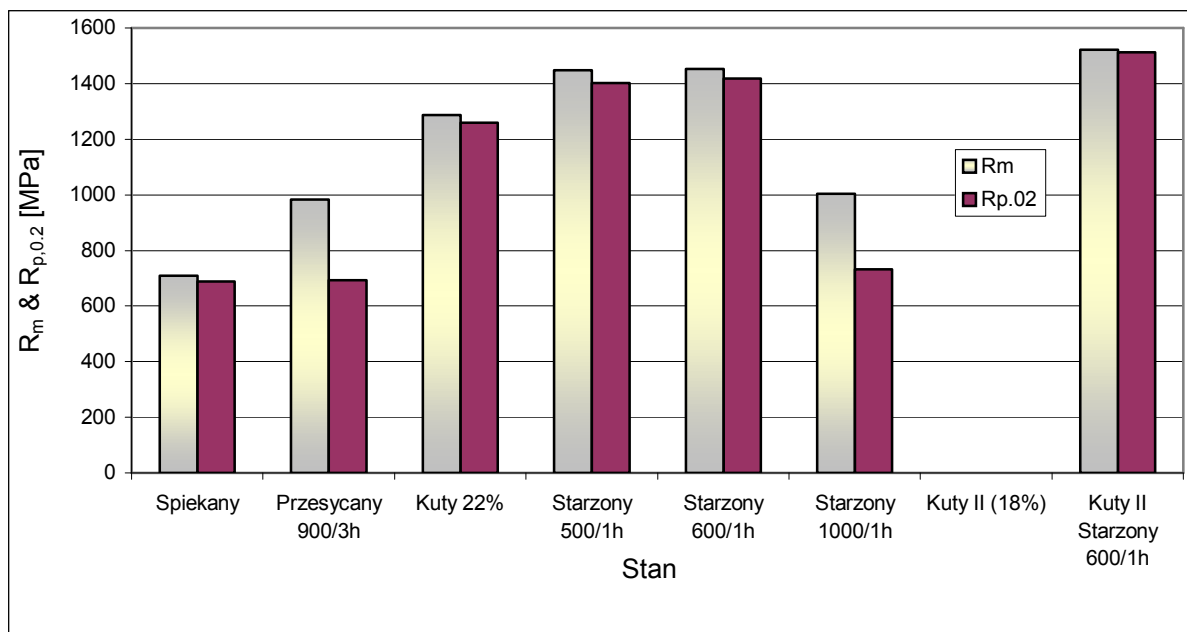


Rys.3. Zmiany wytrzymałości na rozciąganie R_m i umownej granicy plastyczności $R_{p,0.2}$ na różnych etapach procesu technologicznego

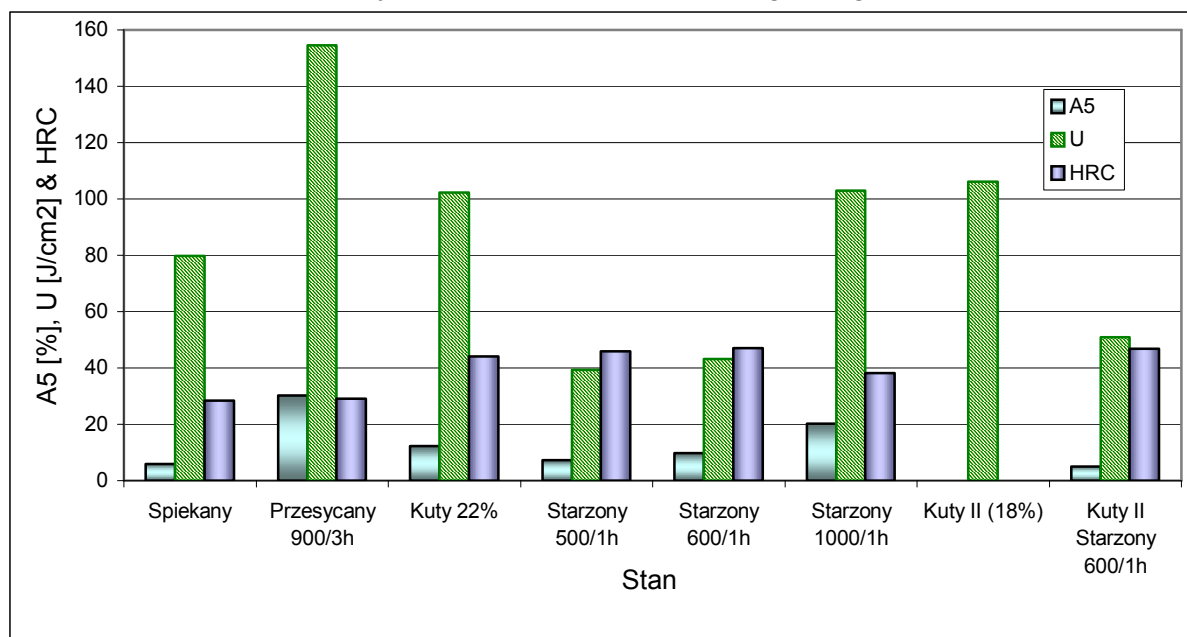


Rys.4. Zmiany twardości HRC oraz wydłużenia A_5 na różnych stadiach procesu technologicznego

Następnie kompozyty wolframowe zostały przekute na kowalce mimośrodowo dźwigniowej z e zgniotem 18 i 22%. Wynik ich badań zamieszczono na rys.5 i 6.



Rys.5. Zmiany wytrzymałości na rozciąganie R_m i umownej granicy plastyczności $R_{p,0.2}$ na różnych etapach procesu technologicznego

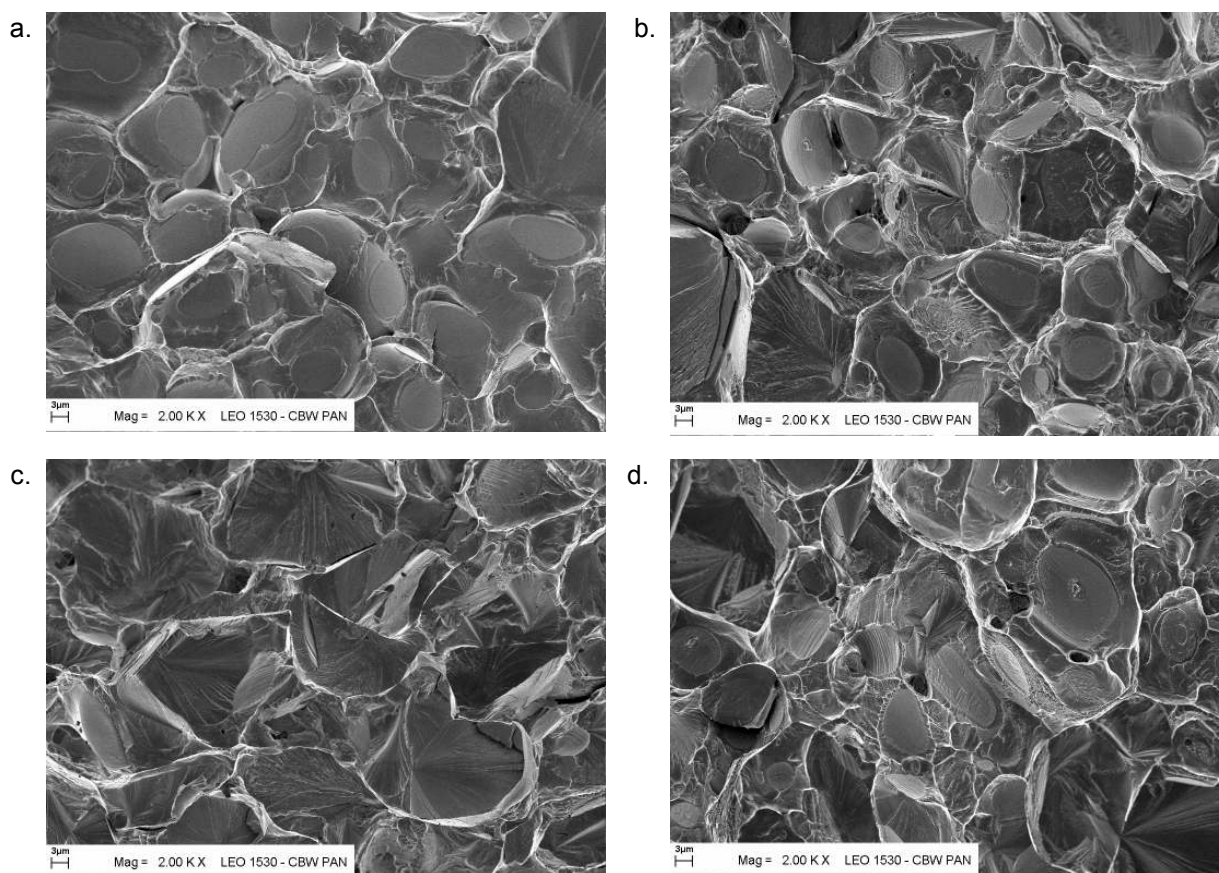


Rys.6. Zmiany wytrzymałości na rozciąganie R_m i umownej granicy plastyczności $R_{p,0.2}$ na różnych etapach procesu technologicznego

Na rys.5 i 6 pokazano wartości odpowiednich właściwości mechanicznych na różnych etapach procesu technologicznego. Z wykresu (rys.5) widać, iż największe wartości wytrzymałościowe uzyskuje materiał kuty, a następnie wyżarzany (starzony).

3.1.2. Wyniki obserwacji fraktograficznych

Na rys.7 zamieszczono wyniki obserwacji fraktograficznych w skaningowym mikroskopie elektronowym f-my LEO 1530 z wykorzystaniem elektronów wtórnych.



Rys.7. Zdjęcia fraktograficzne powierzchni przełomów stopu PR23: a – po spiekaniu, b – po przesycaniu, c – po kuciu i d – po starzeniu

Pierwsze zdjęcie (rys.7a) ukazuje powierzchnię przełomu kompozytu po spiekaniu, na której doskonale widać zaokrąglone ziarna wolframu z dość licznymi płaskimi powierzchniami, tzw. „plackami”, które są miejscami bezpośredniego styku ziaren wolframu. Przełom pokazany na kolejnym zdjęciu (rys.7b) jest wyraźnie odmienny. Obok nielicznych „placków” występują charakterystyczne gładkie pęknięcia transkystaliczne przez ziarna wolframu. W niektórych miejscach, jak na przykład na powierzchni ziarna znajdującego się w pobliżu centralnej części zdjęcia są widoczne drobne wydzielienia. Powierzchnia pęknięcia pokazana na rys.7c i d jest zdominowana przez pęknięcia łupliwe w ziarnach wolframu. Taki charakter przełomu dowodzi znacznej uduwności i wytrzymałości materiału.

3.2. Badania próbek o średnicy wyjściowej 31mm

Kolejny etap obejmował wykonanie stopów i sprawdzenie opracowanej technologii dla prętów ze stopu W-Ni-Fe-Co o większej średnicy. Stopy sporządzono zgodnie z wcześniej opracowaną technologiczną. W szczególności wytwarzanie prętów obejmowało:

- wykonanie mieszanki proszków,

- formowanie porcji mieszanek na prasie kątowej, na kształtki o średnicy ok. 50 mm i długości ok. 480 mm,
- spiekanie w piecu wodorowym w temperaturze ~ 1520°C,
- przesykanie spiekanych sztab poprzez wygrzewanie w próżni w temperaturze 1000°C i chłodzenie w wodzie oraz w temperaturze 1200°C i chłodzeniu w strumieniu azotu.
- kucie na zimno na średnicę ok. ϕ 26 i 27mm i długość 630 i 585mm,
- starzenie w temp. 200 – 250°C w czasie od 8 do 20 godzin,
- kontrolę własności materiału po wybranych operacjach procesu wytwarzania prętów,
- kontrolę końcową wytwarzanych prętów na zgodność z wymaganiami

3.2.1. Wyniki badań własności mechanicznych

Badania własności mechanicznych wykonano na maszynie wytrzymałościowej przy szybkości przesuwu trawersy 1mm/min. Ich celem było wyznaczenie podstawowych własności mechanicznych, a więc wytrzymałości na rozciąganie – R_m , umownej granicy plastyczności $R_{p,0.2}$ oraz wydłużenia względnego A_5 . Wyniki badań zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki badań na maszynie wytrzymałościowej

Oznaczenie Próbki	Własności mechaniczne						Uwagi	
	R_m [MPa]		$R_{p,0.2}$ [MPa]		A_5 [%]			HRC _{śr}
PR26 -1	1005	990	749	740	30.0	25.6	31.0 ± 1.51	Wyżarzanie przez 3h w T =1150°C i chłodzenie w wodzie
	1002		744		26.7			
	963		725		20.0			
PR26 -1	1015	1003	754	742	35.3	31.1	29.2 ± 1.78	Wyżarzanie przez 6h w T =1000°C i chłodzenie w wodzie
	987		731		20.0			
	1007		740		38.0			
PR26 -1	1000	1001	729	730	33.3	35.1		Wyżarzanie przez 6h w T =1000°C i chłodzenie w wodzie
	1008		735		29.3			
	994		726		42.7			
PR18-2PN	970	978	712	712	32.0	29.1		Wyżarzanie przez 10h w T =1200°C i chłodzenie w azocie
	971		717		24.0			
	994		708		31.3			
PR18-2PN	732	730	732	725	30.7	34.9		Wyżarzanie przez 3h w T =900°C i chłodzenie w azocie
	732		717		41.3			
	727		727		32.7			

Z tabeli 1 widać, iż największą wytrzymałością charakteryzują się stopy oznaczone jako PR26 – 1. Obok wysokiej wytrzymałości odznaczają się dobrymi własnościami plastycznymi, która jest warunkiem niezbędnym dla przeprowadzenia obróbki plastycznej metodą kucia. W związku z powyższym przyjęto następujące parametry procesu wyżarzania przed szybkim chłodzeniem: temperatura wygrzewania 1000°C, czas wygrzewania w próżni 6godzin, chłodzenie w wodzie. W wyniku takiej obróbki materiał uzyskuje wytrzymałość około 1000 MPa i wydłużenie względne A_5 ponad 30%. Dla porównania materiał wygrzewany w

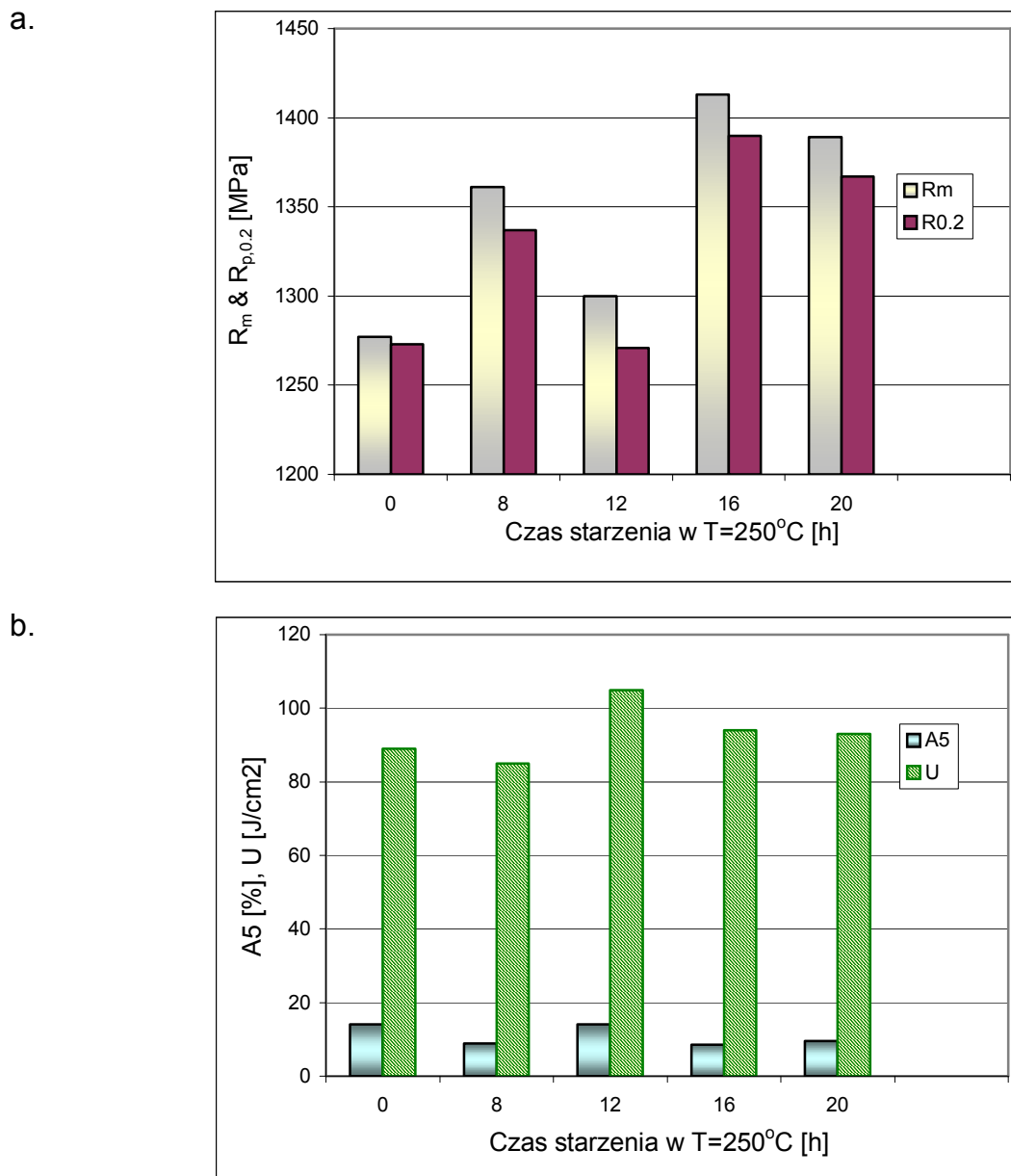
temperaturze 1200⁰C w czasie 10 godzin i chłodzony w strumieniu azotu uzyskał wytrzymałość około 980 MPa i wydłużenie względne A₅ poniżej 30 %.

W dalszej kolejności obrobione cieplnie pręty były kute na średnicę 26 mm na kowarce firmy GFM Stayer-Austria typ SHP 0609. Typowe wymiary po poszczególnych operacjach kucia były następujące: $\phi 31 \rightarrow \phi 29,3 \rightarrow \phi 27,6 \rightarrow \phi 27 \rightarrow \phi 26,3 \rightarrow \phi 26$ mm. Kucie w zakresie średnic $\phi 31 - \phi 27$ mm wykonywano przy posuwie około 300 mm/mim, zaś kucie końcowe (kalibrowanie) wykonywano przy posuwie 150 mm/min. Długość prętów po kuciu wynosiła około 620mm, a strzałka ugięcia na całej długości pręta wynosiła od 0,15 do 0,5mm. Stosunkowo duża strzałka ugięcia (0,5mm) była wynikiem konieczności doboru narzędzi w trakcie procesu kucia

Tabela 2. Wyniki badań własności mechanicznych prętów kutyh (zgniot 24 i 30%) i starzonych w temperaturze 250⁰C w czasie 8; 12, 16 i 20 godzin.

Oznaczenie próbki [Uwagi]	Własności mechaniczne			
	R _m [MPa]	R _{p,0.2} [MPa]	A ₅ [%]	U [J/cm ²]
PR27-12 kB z=24% nie starzony	1290	1287	18,7	125
	1264	1258	9,3	52
42.3 ± 0.78 HRC	1277	1273	14	89
PR27-12 kB z=24% s250-8h - G	1354	1331	9,5	87
PR27-12 kB z=24% s250-8h - D	1338	1319	3,6	38
PR27-12 kB z=24% s250-8h - B	1380	1353	11,0	111
PR27-12 kB z=24% s250-8h - B	1372	1346	11,1	106
	1361	1337	8.8	85
PR26-1 kB z=30% s250-8h - G	1345	1329	10,7	143
PR26-1 kB z=30% s250-8h - D	1324	1305	6,8	44
PR26-1 kB z=30% s250-8h - B	1349	1324	12,5	108
PR26-1 kB z=30% s250-8h - B	1351	1326	10,9	107
	1342	1321	10.2	100
PR26-2 kB z=30% s250-12 - G	1331	1320	13,1	156,0
PR26-2 kB z=30% s250-12 - D	1321	1298	11,6	128,0
PR26-2 kB z=30% s250-12 - B	1318	1275	16,6	197
PR26-2 kB z=30% s250-12 - B	1295	1277	14,7	157
	1316	1292	14.0	160
PR27-1 kB z=30% s250-12 - G	1306	1281	13,9	143
PR27-1 kB z=30% s250-12 - D	1312	1285	6,7	62
PR27-1 kB z=30% s250-12 - B	1306	1281	13,9	102
PR27-1 kB z=30% s250-12 - B	1276	1236	22,1	113
	1300	1271	14.1	105
PR27-12 kB z=24% s250-16h - G	1412	1389	9,6	93
PR27-12 kB z=24% s250-16h - D	1405	1379	7,9	68
PR27-12 kB z=24% s250-16h - B	1423	1402	8,9	122
PR27-12 kB z=24% s250-16h - B	1439	1415	7,8	126
	1413	1390	8.5	94
PR27-12 kB z=24% s250-20h - G	1417	1397	8,6	89
PR27-12 kB z=24% s250-20h - D	1387	1360	6,9	53
PR27-12 kB z=24% s250-20h - B	1373	1353	10,7	116
PR27-12 kB z=24% s250-20h - B	1379	1360	12,1	114
	1389	1367	9.6	93

W oznaczeniu próbki w tabeli 2 zawarte są informacje odnoszące się do historii próbki oraz miejsce pobrania próbki do badań. I tak oznaczenie z = 24% lub z = 30% oznacza wartość zadanego zgniotu, s250 – oznacza, że próbka była starzona w temperaturze 250°C przez czas: 8, 12, 16 lub 20h, zaś litery G, D, B oznaczają odpowiednio, iż próbka do badań została pobrana z górnej, dolnej lub bocznej części pręta.



Rys.8. Wpływ czasu starzenia w temperaturze T = 250°C na własności mechaniczne stopu PR27: a – R_m i R_{p,0.2} oraz b – A₅ i U

Jak widać z tabeli 2, materiał pręta po kuciu miał wytrzymałość na rozciąganie R_m nieco poniżej 1300 MPa oraz średnią udarność badaną na próbkach $\phi 8 \times 55$ mm bez karbu $U_{sr} = 115 \text{ J/cm}^2$. Należy odnotować, iż wyniki badań udarności charakteryzowały się znacznym rozrzutem wartości (84 – 154 J/cm²). Wykresy pokazane na rys.8 ilustrują w sposób graficzny wpływ starzenia po przesycaeniu na własności mechaniczne próbek PR27.

Na podstawie badań ustalono, że materiał wygrzany w temperaturze 250°C w czasie od 8 do 20 godzin ma dobrą wytrzymałość na rozciąganie $R_m > 1370$ MPa, granicę plastyczności $R_{p, 0.2} > 1350$ MPa, wydłużenie względne $A_5 > 8\%$, udarność w zakresie od 44 do 142 J/cm² i twardość HRC 43 do 45. Wydłużenie względne A_5 próbek o bardzo niskiej udarności było znacznie niższe niż próbek o wysokiej udarności.

Badania przeprowadzone w temperaturze -40°C wykazały, że udarność kompozytów, wolframowych, jakkolwiek wyraźnie mniejsza, jest jeszcze na poziomie zadowalającym (tabela 3).

Tabela 3. Wyniki badań udarności w temperaturze -40°C

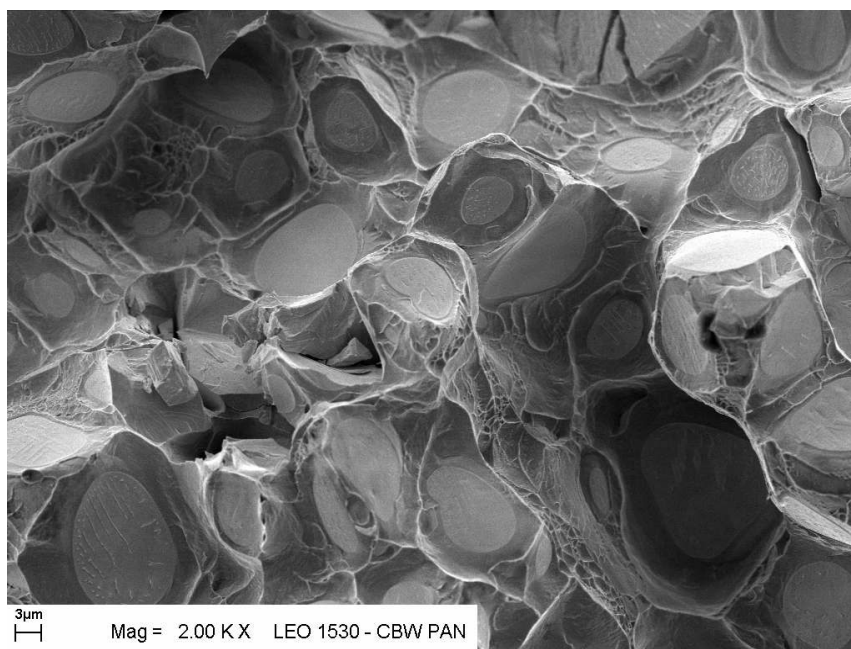
Oznaczenie próbki (Uwagi)	U [J/cm ²]	U _{śr.} [J/cm ²]
PR27 - 1 kB z=30% s250 -12 G	64	66.9
PR27 - 1 kB z=30% s250 -12 D	28	
PR27 - 1 kB z=30% s250 -12 B	65,6	
PR27 - 1 kB z=30% s250 -12 B	110	
PR27 - 1 kB z=30% s250 -12 G	116,3	70.3
PR27 - 1 kB z=30% s250 -12 D	26	
PR27 - 1 kB z=30% s250 -12 B	72,7	
PR27 - 1 kB z=30% s250 -12 B	66,2	

W tym miejscu należy odnotować pewną prawidłowość polegającą na tym, iż wyniki udarności uzyskiwane dla próbek pobranych z dolnej części pręta wolframowego były za każdym razem wyraźnie mniejsze od wartości uzyskanych z próbek wyciętych z części górnej i bocznych (tabela 2 i 3). W celu znalezienia odpowiedzi na trudne do wyjaśnienia rozbieżności wyników wykonano obserwacje w skaningowym mikroskopie elektronowym.

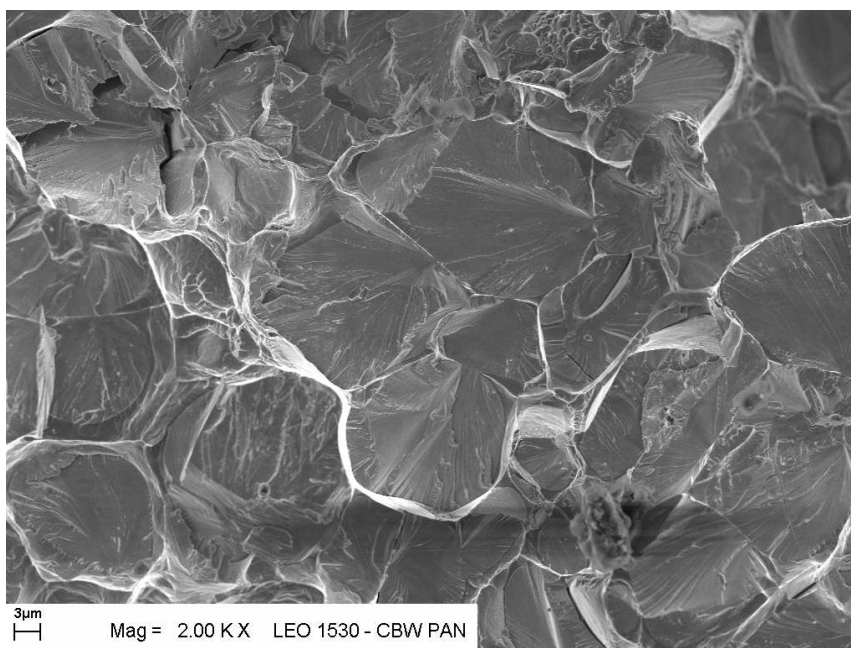
3.2.1. Wyniki badań własności mechanicznych

Na rys.9 zamieszczono przykłady typowej morfologii przełomu próbek udarnościowych pobranych z dolnej i górnej części pręta z kompozytu wolframowego. Łatwo zauważyć, że przełomy są całkowicie różne. Przełom pokazany na rys.9a ukazuje typowo kruchy charakter powierzchni przełomu. Jego cechą charakterystyczną są płaskie powierzchnie bezpośredniego styku ziaren wolframu, często udekorowane dość dużymi wydzieleniami. Między ziarnami wolframu widać lokalnie obszary osnowy, których zniszczenie ma charakter plastyczny [6], czego dowodem są charakterystyczne kratery. Przełom próbki pobranej z górnej części pręta jest zdominowany przez płaszczyzny łupliwości wolframu (rys,9b). Od czasu do czasu występują pęknięcia wtórne, propagujące w kierunku mniej więcej prostopadłym do powierzchni pęknięcia głównego.

a.



b.



Rys.9. Zdjęcie powierzchni przełomu próbki: a –wykonanej z dolnej części pręta, b – z górnej części pręta

Jakkolwiek, pękanie po płaszczyznach łupliwości nie jest pękaniem wysokoenergetycznym tym niemniej, biorąc pod uwagę bardzo wysokie własności wytrzymałościowe wolframu, naprężenie pęknięcia wzdłuż płaszczyzn $\{100\}$ wolframu wymaga wystąpienia znacznego naprężenia dla jego zainicjowania. To z kolei oznacza, iż wytrzymałość na granicy międzyfazowej wolfram – osnowa musi być bardzo duża, a na pewno większa od naprężenia pęknięcia łupliwego. Wyniki obserwacji w SEM są jednak niewystarczające by można było jednoznacznie zinterpretować znaczną różnicę własności, zwłaszcza udarności, w próbkach pochodzących z górnej i dolnej części pręta. Badania w tym zakresie są kontynuowane.

4. Podsumowanie wyników i wnioski

Na podstawie badań wykazano, że opracowany w IMiK wolframowy stop ciężki W–Ni–Fe–Co umożliwia uzyskanie założonych przez konstruktorów, bardzo wysokich własności mechanicznych, wymaganych od rdzeni na podkalibrowe pociski przeciwpancerne kaliber 120mm.

Podczas realizacji pracy stwierdzono, iż niektóre metody badań własności są mało wrażliwe na zmianę parametrów użytkowych materiału ocenianych podczas jego wytwarzania. Na przykład twardość materiału spiekane go i przesyconego mierzona metodą Rockwella w skali C praktycznie nie zmienia się (rys.2, 4 i 6). Twardość HRC nie wykazuje istotnych różnic również w wypadku badania materiału kute go ze zgniotem 15, 20 czy 30 %. Najprawdopodobniej jednym z powodów tego jest fakt, iż badany materiał jest kompozytem zawierającym dwie fazy, z których jedna (wolfram) jest bardzo twarda w porównaniu do osnowy stanowiącej tylko niewielką część objętości. W tym wypadku możliwość swobodnego odkształcenia tej ostatniej podczas pomiaru twardości jest silnie ograniczana przez szkielet utworzony z ziaren wolframu, zwłaszcza wtedy, gdy połączyły się one podczas spiekania.

Badania struktury, szczególnie obserwacje fraktograficzne są wyjątkowo cennym narzędziem identyfikacji wad materiału, wykazują również znaczne różnice obrazu przełomu pomiędzy materiałem spieczonym a materiałem przesyconym po spieczeniu. Trudno zaobserwować różnicę w strukturze przełomów próbek przesyconych i próbek kutych. Materiał kuty ze zgniotem około 30% i starzony ma granicę plastyczności $R_{p,0.2}$ bliską wytrzymałości na rozciąganie R_m . Bardzo trudno ustalić korelację pomiędzy wytrzymałością materiału a jego udarnością, która to cecha charakteryzuje się dużym rozrzutem, a ponadto jest złożoną funkcją zarówno własności wytrzymałościowych jak i plastycznych. Z kolei wpływ zgniotu doskonale odzwierciedlają zmiany wydłużenia, które systematycznie maleje ze wzrostem wartości zgniotu. Dość dobrą korelację obserwuje się pomiędzy wydłużeniem względnym a udarnością badaną w temperaturze pokojowej.

Istotnym spostrzeżeniem podczas realizacji pracy było stwierdzenie różnic własności w zależności od miejsca wycięcia próbek do badań, co dotyczy to przede wszystkim badania udarności. Jakkolwiek nie udało się na tym etapie rozsądzić w sposób jednoznaczny przyczyn tego zjawiska tym niemniej autorzy są przekonani, iż musi mieć ono związek z faktem bezpośredniego kontaktu dolnej części wypraski z podsypką w postaci proszku Al_2O_3 .

Mimo powyższych uwag ustalono ponad wszelką wątpliwość, że wykonana partia próbna prętów spełnia wymagania konstruktorów rdzeni pocisków. Ma własności zbliżone do własności materiałów innych producentów wolframowych stopów ciężkich. Opracowany materiał po spiekaniu i obróbce cieplnej przesykania jest plastyczny, można go bez obawy uszkodzenia kuć na zimno z sumarycznym zgniotem nawet kilkudziesięciu procent. Materiał kuty jest wrażliwy na obróbkę cieplną starzenia w temperaturach od 200 do 1000°C. Obróbka ta umożliwia ukształtowanie własności mechanicznych materiału wg ustalonych wymagań.

Literatura

- [1]. Lenel F.V.: Powder Metallurgy Principles and Applications, 1980, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New York, p. 287.
- [2]. Bose A., Kapoor D., Magness L.S. Jr., Dowding R.J.: Princeton, 1997, p.321
- [3]. German R.M.: Liquid Phase Sintering, 1985, Plenum Press, New York.
- [4]. Rabin B.H., Bose A., German R.M: Characteristics of Liquid Phase sintered Tungsten Heavy Alloys, J. Powder Metallurgy, 25 (1989), p.21.+-
- [5]. Cybula L., Horubała Z., Ludyński Zb., Nowak W., Rafalski M.: Rudy i Metale Nieżelazne, 50 (2005) s.513-516.
- [6]. Metals Handbook, Ninth Edition, vol. 12: Fractography, ASM International, Metals Park, Ohio, 1987.