

Materiały Wysokoenergetyczne / High-Energetic Materials, 2015, 7, 80 – 89
ISSN 2083-0165

Wpływ wybranych parametrów układów wybuchowych na właściwości fizyko-mechaniczne spieku miedzi ***Influence of the selected parameters of explosive systems on the physical-mechanical properties of sintered copper***

Leszek Szymańczyk^{1,*}, Katarzyna Kowalczyk¹, Jacek Janiszewski²

1) Wydział Nowych Technologii i Chemii, Wojskowa Akademia Techniczna,
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 46, PL

2) Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna,
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 46, PL

*E-mail: leszek.szymanczyk@wat.edu.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki pilotażowych prac eksperymentalnych, których celem było zbadanie możliwości otrzymania wysoko jakościowych spieków miedzi jedynie w wyniku zastosowania technologii zagęszczania wybuchowego. Przeprowadzono serię testów wybuchowych z zastosowaniem układów cylindrycznych o różnych grubościach warstw materiał wybuchowego i dla wybranych mieszanin wybuchowych bazujących na amonalu i heksogenie. Jakość materiału spieku miedzi oceniono na podstawie wyników pomiaru gęstości, twardości, obserwacji mikroskopowych, jak również bazując na rezultatach badań wytrzymałościowych w warunkach quasi-statycznego i dynamicznego obciążenia (metoda dzielonego pręta Hopkinsona). Stwierdzono, że jest możliwe wytwarzanie wysoko jakościowego spieku miedzi o właściwościach fizyko-mechanicznych zbliżonych lub wyższych od miedzi litej jedynie z zastosowaniem technologii zagęszczania wybuchowego.

Abstract: The results of preliminary tests aiming to check manufacturing possibility of high-quality sintered copper by using explosive compaction technique were presented in this paper. A series of explosive test were conducted for cylindrical systems with different explosive layer thickness and with the use of various explosive compositions based on hexogene or ammonal. The quality of sintered copper samples was assessed on the basis of density, hardness, optical microscopy observations and results of strength testing performed both under quasi-static and high strain rate loading condition (split Hopkinson Pressure Bar test). It has been found that it is possible to obtain high-quality sintered copper with physical-mechanical properties similar or better than bulk copper with the use of only explosive compaction method.

Słowa kluczowe: prasowanie wybuchowe, metalurgia proszków, mechaniczne właściwości materiałów konstrukcyjnych

Keywords: explosive compacting, powder metallurgy, mechanical properties of engineering materials

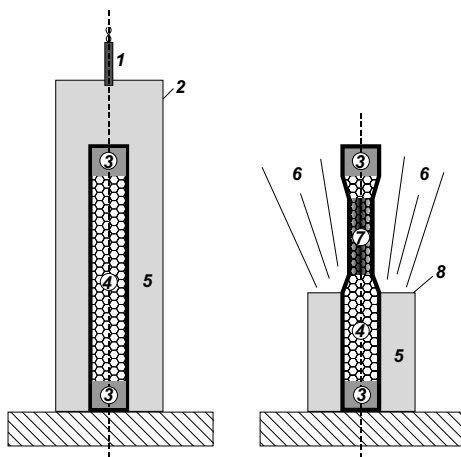
1. Wprowadzenie

Jednym z głównych kierunków rozwoju technologii metalurgii proszków jest dążenie do stosowania proszków o coraz mniejszych rozmiarach cząstki [1]. Dzięki temu możliwe jest wytwarzanie materiałów spiekanych charakteryzujących się oryginalnymi właściwościami fizyko-mechanicznymi, niemożliwymi do osiągnięcia innymi technologiami wytwórczymi. Obecnie można spotkać bardzo wiele przykładów stosowania proszków mikrometrycznych, czy nawet nanometrycznych. Ich użycie wiąże się jednak z wieloma trudnościami technologicznymi, do który można zaliczyć: problemy związane z kształtowaniem wyprasek o możliwie wysokiej gęstości, problem rozrostu ziaren krystalicznych podczas spiekania.

W literaturze dotyczącej metalurgii proszków [2] często wskazuje się na kwestie prasowalności drobnych proszków, gdyż obserwuje się wyraźne pogorszenie tego parametru wraz ze zmniejszeniem się wymiarów cząstek proszku. W przypadku mikrometrycznych proszków sferycznych niektórych metali jest wręcz niemożliwe otrzymanie spójnej wypraski o odpowiednio wysokiej gęstości. Stąd jest konieczność stosowania specjalnych metod prasowania proszków, jak np. prasowania izostatycznego na gorąco.

Stosowanie powyższej techniki prasowania proszków, jak i innych, w których do konsolidacji cząstek proszków wykorzystuje się operację spiekania, czyli wygrzewania wypraski w temperaturze określonej dla danego proszku lub mieszanki proszkowej, wiąże się niestety z utratą pożądaną mikrometrycznej struktury spieku. Rozrost ziaren krystalicznych podczas spiekania jest bowiem naturalną konsekwencją procesów zachodzących w czasie długotrwałego wygrzewania wypraski, i jest on tym bardziej wyraźny, gdy czas spiekania jest coraz dłuższy. Aby zminimalizować efekt rozrostu ziaren opracowano techniki umożliwiające prasowanie i spiekanie w stosunkowo krótkim czasie. Przykładem takich technologii może być metoda spiekania iskrowego (*ang. Spark Plasma Sintering – SPS*) lub technologia selektywnego spiekania laserowego (*ang. Selective Laser Sintering – SLS*) [1]. Jednak pomimo osiągania stosunkowo krótkich czasów spiekania za pomocą ww. technologii (od kilku sekund do kilkunastu minut) obserwuje się także znaczący rozrost ziaren, gdyż struktura cząstek mikrometrycznych ukształtowana w procesie wytwórczym danego proszku jest niestabilna termodynamicznie. Dlatego wciąż obserwuje się próby poszukiwania jeszcze innych sposobów wytwarzania spieków z ultra drobnych proszków. Przykładem takich poszukiwań jest technologia prasowania wybuchowego [3, 4].

Prasowanie wybuchowe jest znaną od dawna metodą otrzymywania wyprasek o dużej gęstości z proszków trudno prasujących się. Technologia ta nie znalazła szerokiego zastosowania w przemyśle z powodu ograniczeń związanych, z użyciem materiałów wybuchowych (MW) i specyfiką procesu prasowania wybuchowego. Jednak jej zalety powodują, że często jest rozpatrywana w przypadku, gdy mamy do czynienia z produkcją jednostkową wysoko zaawansowanych materiałów inżynierskich.



Rys. 1. Układ eksperymentalny do dynamicznej konsolidacji: 1 – detonator; 2 – pojemnik na materiał wybuchowy np. rura z polichloru winyli; 3 – korki zamykające rurę z proszkiem metalu; 4 – proszek metalu; 5 – MW; 6 – gazy powychwowe; 7 – wypraska; 8 – front detonacji

Prasowanie wybuchowe zalicza się do dynamicznych metod prasowania. Uzyskiwane wypraski charakteryzują się dużą jednorodnością (w całej objętości prasowanej próbki) oraz wysokim stopniem zagęszczenia materiału. Oprócz tego, podczas wybuchowego prasowania dochodzić może do spiekania cząstek proszków. Wynika to z uderowego obciążenia gdy energia przekazana cząstkom proszku wydziela się m. in. w postaci ciepła, w największym stopniu na powierzchni cząstek proszku, które może wywołać częściowe nadtopienie materiału proszku. Dochodzi wtedy do łączenia się ziaren, a wewnątrz ziaren pozostaje relatywnie chłodne. Materiał

stopiony na skutek szybkiego odprowadzania ciepła w głąb ziaren krzepnie i uzyskuje metastabilną strukturę, tworząc silne połączenie między ziarnami. Ziarna zachowują wyjściową strukturę, gdyż temperatura końcowa zaprasowanego elementu jest niższa od temperatury rekrytalizacji [3].

Prasowanie z użyciem MW najczęściej polega na bezpośrednim oddziaływaniu produktów detonacji na pojemnik z proszkiem. Własności wyprasek, zależą w dużej mierze od:

- impulsu ciśnienia,
- materiału pojemnika,
- gęstości początkowej proszku,
- właściwości fizycznych proszku.

Do wybuchowego prasowania proszków stosowane są różne układy. Najczęściej wykorzystywany jest układ cylindryczny przedstawiony na rys. 1.

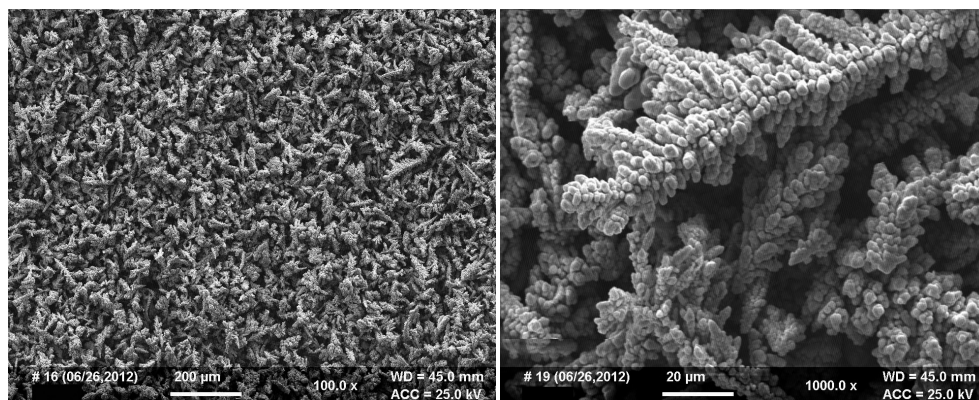
Przebieg procesu wybuchowego zagęszczania jest następujący: zainicjowanie ładunku prowadzi do powstania fali detonacyjnej przemieszczającej się w kierunku osiowym. Rozchodząca się wzdłuż ścianki pojemnika fala detonacyjna oddziałuje na rurkę z proszkiem, powodując powstanie w próbce fali uderzeniowej. W wyniku zachodzących procesów indukowanych oddziaływaniem fali uderzeniowej następuje zagęszczenie i/lub spiekanie cząstek proszku.

W związku z tym, iż prasowanie wybuchowe z jednoczesnym spiekaniem proszków jest dużym wyzwaniem badawczym, podjęto próbę przeprowadzenia pilotażowych badań mających na celu dobór parametrów układu wybuchowego umożliwiającego otrzymanie wysoko jakościowych spieków miedzi. W ramach eksperymentu: przeprowadzono badania charakterystyk wybuchowych dwóch wytypowanych materiałów wybuchowych, zaprojektowano i wykonano układy do wybuchowego prasowania proszku miedzi, otrzymano spieki miedzi. Uzyskane próbki poddano standardowym badaniom materiałowym: pomiarom gęstości, twardości i wytrzymałości na ściskanie. Ponadto, wykonano badania w warunkach testu dzielonego pręta Hopkinsona w celu oceny dynamicznych właściwości wytrzymałościowych badanych spieków.

2. Metodyka badań

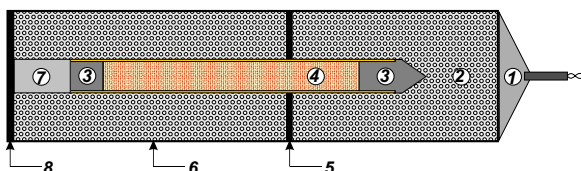
2.1. Zastosowane materiały i konstrukcja układu wybuchowego

Konsolidację wybuchową wykonano dla elektrolitycznego proszku miedzi gatunku ECU1, odmiana 0,040 o następującym rozkładzie granulometrycznym: D10 = 2,8 μm , D50 = 11 μm , D90 = 19,5 μm . Użyty proszek charakteryzuje się budową dendrytyczną, korzystną ze względu na potrzebę otrzymania drobnoziarnistej struktury spieku (rys. 2).



Rys. 2. Elektrolityczny proszek miedzi ECU1, odmiana 0,040

Wybuchowe prasowanie przeprowadzono z zastosowaniem układu cylindrycznego, którego schemat przedstawiono na rys. 3. Zasadniczym elementem układu jest rurka mosiężna o średnicy wewnętrznej 10 mm oraz wysokości 120 mm, do której wsypywano proszek miedzi. Proszek miedzi wstępnie zaprasowywano ręcznie poprzez wprowadzanie do rurki niewielkich porcji proszku miedzi i ubijaniu ich odpowiednim stemplem (gęstość wstępnego zaprasowania – $5,37 \text{ g/cm}^3$). Napełnioną rurkę obustronnie zamkniętą umieszczano w rurze z tworzywa sztucznego, którą zasypywano MW (rys. 3).



Rys. 3. Schemat układu cylindrycznego do prasowania proszków zastosowany w badaniach: 1 – detonator z zapalnikiem; 2 – MW; 3 – korki zamykające rurkę; 4 – rurka mosiężna z proszkiem miedzi; 5 – podkładka stabilizująca rurkę; 6 – rura z polichloroku winylu; 7 – łapacz pędu; 8 – podkładka stabilizująca układ i zamykająca dno rury 6

W badaniach wykorzystano dwa rodzaje MW: amonal oraz mieszaninę heksogenu z tlenkiem cynku (w jednym przypadku mieszaninę heksogenu z olejem). Wybór materiałów wynikał z doświadczeń autorów oraz analizy literatury związanej z badanym zagadnieniem [5]. Prędkość detonacji powinna mieścić się w zakresie $1500 \div 4000 \text{ m/s}$. Wprawdzie MW o zbyt wysokich parametrach detonacyjnych powodują powstawanie wewnątrz próbki wytopionego, pustego kanału, jednak ze względów poznawczych nie odrzucono tego typu układów wybuchowych.

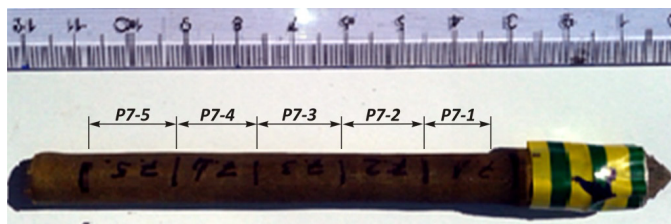
Dla ww. mieszanin wybuchowych przygotowano 7 układów badawczych zawierających amonale oraz 6 układów elaborowanych mieszaninami bazującymi na heksogenie. Ponadto, układy różniły się grubościami warstwy MW. Skład kompozycji użytych mieszanin wybuchowych oraz dane dotyczące grubości warstwy MW i prędkości detonacji podczas zagęszczania wybuchowego zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Rodzaje i wybrane parametry zastosowanych układów wybuchowych

Oznaczenie testu	Rodzaj MW	Grubość warstwy MW [mm]	Prędkość detonacji [m/s]	Błąd bezwzględny [m/s]
P1	Amonal 5%	18	3436	89
P2	Amonal 1%	18	2342	60
P3	Amonal 1%	13	2050	52
P4	Amonal 5%	13	3021	78
P5	Amonal 5%	30,5	3509	91
P6	Amonal 1%	30,5	2755	71
P7(rurka miedziana)	Amonal 5%	18	3385	76
P8	35%ZnO/65%RDX	7	2567	66
P9	40%ZnO/60%RDX	13	Brak detonacji	
P10	40%ZnO/60%RDX	7	Brak detonacji	
P11	20%olej/ 80%RDX	7	5362	141
P12	20%ZnO/80%RDX	7	3941	102
P13	30%ZnO/70%RDX	7	3147	81

W następstwie wykonanych testów wybuchowych otrzymano zestaw próbek materiałowych (wałków). Zostały one poddane obróbce skrawaniem w celu usunięcia warstwy materiału rurki osłonowej i podzielenia ich na pięć części (rys. 4). Otrzymane próbki ponumerowano zgodnie z oznaczeniami przedstawionymi na rys. 4, gdzie

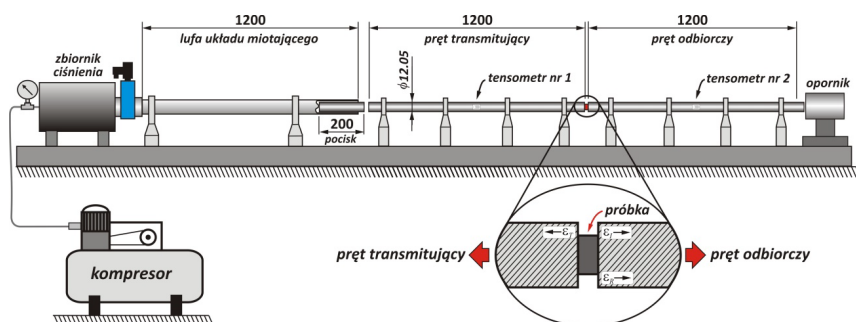
np. P7 oznacza numer testu, a następująca po nim liczba określa kolejność segmentu, licząc od strony punktu inicjacji układu. Stosując metodę elektroerozyjnego cięcia drutem wykonano z poszczególnych segmentów zestawy próbek materiałowych przeznaczonych do badań: metalograficznych, pomiaru gęstości, twardości i właściwości wytrzymałościowych.



Rys. 4. Widok rurki zawierającej proszek miedzi po obciążeniu wybuchowym (test P7)

2.2. Metodyka oceny konsolidacji wybuchowej proszku miedzi

Do oceny konsolidacji proszku miedzi w warunkach wybuchowego obciążenia zastosowano standardowe metody i narzędzia pomiarowe, takie jak: obserwacje metalograficzne (mikroskop optyczny Carl ZEISS AxioObserver.Z1m), pomiar gęstości spieku (metoda hydrostatyczna); pomiar twardości (metoda Brinella – twardościomierz Zwick Z1); statyczna próba ściskania (maszyna wytrzymałościowa MTS Criterion C45.105). Ponadto, do oceny właściwości mechanicznych spieków miedzi zastosowano technikę dzielonego pręta Hopkinsona (ang. *Split Hopkinson Pressure Bar – SHPB*). Umożliwia ona wyznaczenie charakterystyk wytrzymałościowych (dynamiczne krzywe umocnienia) w warunkach udarowego obciążenia. Metoda Hopkinsona jest nieznormalizowaną techniką pomiarową, lecz mimo to jest ona obecnie powszechnie stosowana w badaniu materiałów przeznaczonych na elementy konstrukcji obciążanych udarowo [6, 7]. Układ badawczy (rys. 5) składa się z trzech zasadniczych podzespołów: mechanicznego, pomiarowego i zasilania. Podzespół mechaniczny obejmuje układ dwóch prętów o długości 1200 mm i o średnicy 12,05 mm, które zostały wykonane ze stali maraging MS 350 o twardości 54 HRC ($R_{0,2} = 2300$ MPa). Współosiowo położenie prętów gwarantuje zespół ośmiu podpór wyposażonych w łożyska liniowe. Z kolei podpory zamocowano na ławie optycznej umożliwiającej precyzyjną regulację ich położenia. Ponadto w skład podzespołu mechanicznego stanowiska wchodzi pneumatyczny układ motający, zapewniający napędzanie pręta wymuszającego o długości 200 mm w zakresie prędkości od 4 m/s do 30 m/s.



Rys. 5. Schemat stanowiska badawczego metody Hopkinsona zastosowanego w badaniach

Podzespół pomiarowy obejmuje następujące główne elementy: dwukanałowy wzmacniacz tensometryczny SGA0BV5 Zakładu Aparatury Elektronicznej „ATA”, mikromierz laserowy optoCONTROL ODC 1200/90 oraz oscyloskop cyfrowy LeCroy WJ354A. Z kolei zespół zasilający składa się z 12 V zasilacza mikromierza laserowego oraz kompresora.

Istota badania metodą Hopkinsona polega na deformacji plastycznej próbki materiałowej pomiędzy czołami prętów transmitującego i odbiorczego. Na skutek uderzenia cylindrycznego pocisku (pręt wymuszający), w pręcie transmitującym wygenerowana jest fala sprężysta o amplitudzie ε_i , która przemieszcza się wzdłuż pręta z prędkością dźwięku. Fala ta jest nazywana falą wymuszającą (*ang. incident* lub *input wave*). Fala wymuszająca ε_i dochodząc do czoła pręta transmitującego, będącego w kontakcie z próbką, przechodzi częściowo do próbki materiałowej, zaś pozostała część fali, w postaci rozciągającej fali naprężenia ε_R , odbija się od czoła pręta. W deformowanej próbce, część fali wymuszającej ulega dalszym, kilkakrotnym odbiciom, a pozostała część przejmowana jest przez pręt odbiorczy w postaci tzw. fali transmitującej (przechodzącej) ε_T (*ang. transmitted* lub *output wave*). Kształt tej fali odzwierciedla dynamiczną reakcję materiału próbki.

3. Wyniki badań

Badania materiałowe rozpoczęto od określenia gęstości i porowatości otrzymanych wybuchowo spieków. Wyniki tych prac zestawiono w tabeli 2, gdzie przedstawiono wartości średnie. Badaniem nie objęto próbek z testów P9 i P10, gdyż ze względu na ich niską wytrzymałość ulegały one pękaniu podczas obróbki mechanicznej (brak detonacji MW – patrz tabela 1).

Tab. 2. Gęstości i porowatości spieków miedzi otrzymanych metodą prasowania wybuchowego

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P11	P12	P13
Gęstość [g/cm^3]	6,86	8,54	8,60	6,76	7,17	7,48	7,39	7,71	8,8	6,33	7,72
Porowatość [%]	22,9	4,1	3,4	24,1	19,5	15,9	17,0	13,4	1,1	28,8	13,2

Na podstawie danych z tabeli 2 można stwierdzić, że gęstości otrzymanych spieków są znacząco niższe od gęstości miedzi litej ($8,9 \text{ g}/\text{cm}^3$). Wyjątek stanowią spieki testu P2, P3 i P11, które osiągnęły najwyższe gęstości, bliskie teoretycznej. Ponadto, dla ładunków zawierających amonal można dostrzec słabą korelację pomiędzy grubością warstwy MW, a gęstością/porowatością spieków. Obserwuje się bowiem wzrost gęstości spieku wraz ze zwiększeniem się grubości warstwy MW. Wyjątkiem jest tu test P3, w przypadku którego pomimo zastosowania cienkiej, 13 mm warstwy MW otrzymano spiek o wysokiej gęstości. Nietypowe jest również to, że otrzymane wyniki nie wskazują na charakterystyczną zależność pomiędzy gęstością zaprasowania, a prędkością detonacji. Nie stwierdzono bowiem w wielu przypadkach testów, aby ze wzrostem prędkości detonacji zwiększał się także stopień zaprasowania proszku. Te niezgodne z oczekiwaniami dane eksperymentalne prawdopodobnie mają swoje źródło w niepoprawności i niepowtarzalności przygotowania układów wybuchowych. Dotyczy to w szczególności zasypywania i wstępnego zaprasowywania proszku w rurce osłonowej. Wykonywanie tej czynności w sposób ręczny nie gwarantowało powtarzalności w wypełnieniu rurki proszkiem, pomimo zachowywania wysokiej staranności podczas wykonywania tej operacji. Ponadto, przyjęty sposób zasypu proszku i zamknięcia wewnątrz rurki osłonowej sprawiał, że w jej wnętrzu zamykana była pewna objętość powietrza, różna dla każdego układu, który musiał utrudniać konsolidację cząstek proszku. Stąd wniosek o konieczności zmiany procedury zasypu proszku oraz opracowania metody usuwania powietrza z przestrzeni zasypowej i szczelnego jej zamykania.

Szczegółowe pomiary twardości próbek pobranych z różnych części wałka ujawniają także nietypowe właściwości otrzymanych spieków (tabela 3). Nie obserwuje się bowiem przewidywanego wzrostu twardości materiału spieku wraz ze wzrostem jej gęstości. Najwyższą twardość odnotowano dla spieku testu P13 – 93HB (gęstość – $7,72 \text{ g}/\text{cm}^3$), podczas gdy spiek testu P11 posiadający najwyższą gęstość ($8,8 \text{ g}/\text{cm}^3$) wykazał najniższą średnią twardość wynoszącą zaledwie 65 HB.

Wyniki testu P13 można wytłumaczyć niską intensywnością procesu konsolidacji, co spowodowało jedynie zaprasowanie (bez spiekania) i umocnienie odkształceniowe materiału proszku. Natomiast, podczas testu P11, dla którego zarejestrowano najwyższą prędkość detonacji (5362 m/s – patrz tabela 1), oprócz ww. procesów dodatkowo prawdopodobnie zaszła dynamiczna rekrytalizacja, która usunęła skutki zgniotu (umocnienia) i w konsekwencji obniżyła twardość materiału spieku. Wniosek ten znajduje potwierdzenie w wynikach

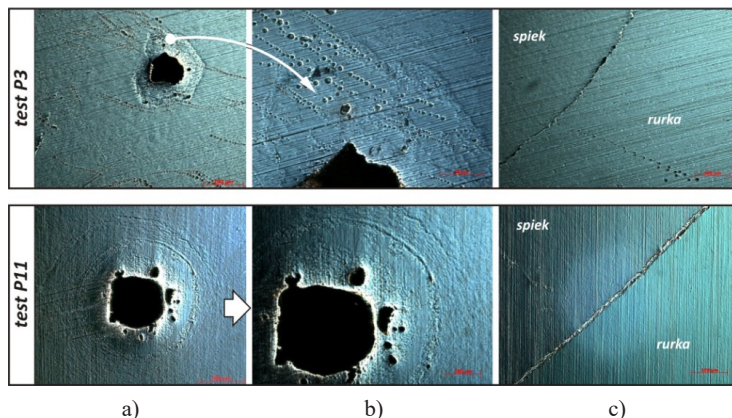
pomiaru twardości wykonanych na materiale rurki miedzianej przed i po zaprasowaniu w niej proszku miedzi metodą wybuchową. W pierwszym przypadku uzyskano twardości równą 82 ± 2 HB (umocniony materiał rurki po procesie jej wytwarzania – obróbka plastyczna - ciągnienie), zaś w drugim 60 ± 10 HB (materiał rurki zrekrystalizowany w wyniku oddziaływania ciepła wydzielającego się podczas prasowania wybuchowego).

Tab. 3. Twardość HB spieków miedzi otrzymanych metodą prasowania wybuchowego

Oznaczenie testu	Próbka nr 1	Próbka nr 2	Próbka nr 3	Próbka nr 4	Próbka nr 5	Średnia
P1	79 ± 2	83 ± 14	83 ± 14	80 ± 8	59 ± 4	77
P2	83 ± 4	67 ± 5	76 ± 3	82 ± 4	79 ± 14	77
P3	92 ± 3	84 ± 4	86 ± 1	87 ± 3	86 ± 3	87
P4	79 ± 5	82 ± 2	82 ± 3	89 ± 3	62 ± 9	79
P5	83 ± 3	81 ± 4	84 ± 3	82 ± 3	89 ± 5	84
P6	83 ± 3	87 ± 4	80 ± 2	93 ± 3	103 ± 11	89
P7	97 ± 3	88 ± 2	77 ± 2	83 ± 5	90 ± 2	87
P8	80 ± 5	81 ± 3	76 ± 4	82 ± 5	85 ± 6	81
P11	85 ± 7	58 ± 16	67 ± 13	51 ± 5	66 ± 11	65
P12	85 ± 4	82 ± 2	89 ± 6	82 ± 3	90 ± 8	86
P13	106 ± 5	82 ± 3	100 ± 9	86 ± 4	90 ± 2	93

Wyniki zawarte w tabeli 3 dowodzą także, że niektóre otrzymane wałki charakteryzują się dużym zróżnicowaniem twardości wzdłuż jego długości. Przykładowo próbki testu P1 wykazywały twardości mieszczące się w przedziale od 59 HB do 83 HB. Różnice te mogły być spowodowane zarówno niejednorodnością struktury spieku wynikające z różnic w gęstości spieku, jak i intensywności procesu rekrystalizacji. W tym miejscu należy zwrócić uwagę na fakt, że zaobserwowano także różnice w twardości na przekroju poprzecznym próbki. W obszarze bliskim osi próbki stwierdzono nieco niższą twardość niż w pozostałych jej obszarach. Potwierdza to tezę o występowaniu procesu rekrystalizacji, gdyż oddziaływanie cieplne jest najdłuższe w pobliżu osi próbki, dzięki czemu rekrystalizacja materiału spieku może zachodzić w największym stopniu.

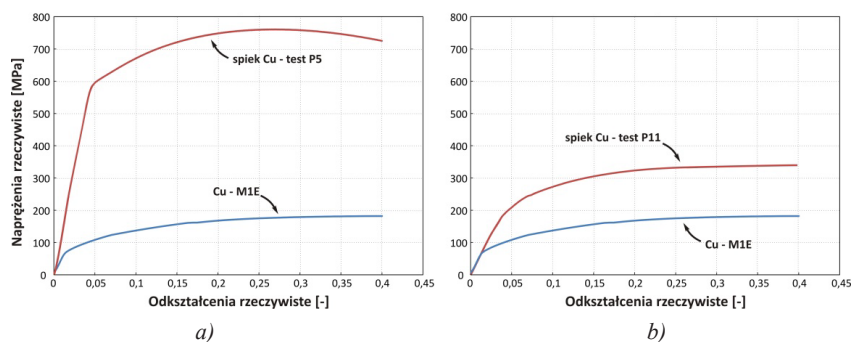
O tym, że w pobliżu osi podłużnej prasowanego proszku dochodzi do powstania ekstremalnych warunków konsolidacji z wydzieleniem dużej ilości ciepła dowodzą zdjęcia mikroskopowe zglądów poprzecznych próbek (rys. 6). W niektórych przypadkach testów zaobserwowano otwory o małej średnicy biegnące wzdłuż osi wałków. Jest to znane i opisywane w literaturze zjawisko, które jest następstwem kumulacji koncentrycznej fali uderzeniowej [3], w wyniku oddziaływania której powstają pustki i dochodzi to przetopienia materiału obciążonego wybuchowo.



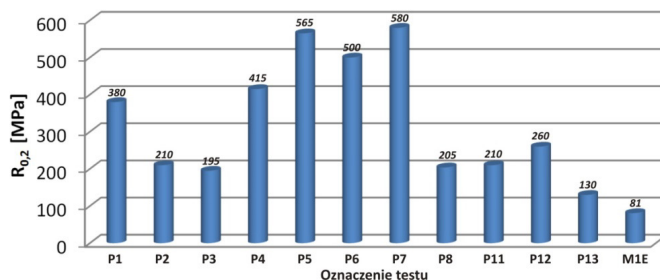
Rys. 6. Przykładowe zdjęcia mikroskopowe spieków miedzi otrzymanych wybuchowo: a) i b) widok obszaru osi próbki; c) widok obszaru połączenia materiału rurki osłonowej ze spiekem

Na rys. 6 przedstawiono wyniki obserwacji mikroskopowych przeprowadzonych dla testu P3 i P11. Na początku analizy ww. fotografii zwraca przede wszystkim uwagę fakt, że średnica otworu dla testu P3 (rys. 6a) wynosząca około 0,18 mm jest mniejsza od średnicy otworu próbki z testu P11 ($\phi \approx 0,5$ mm). Jest to zgodne z przewidywaniami, gdyż w przypadku testu P11 zastosowano mieszaninę wybuchową heksogen/olej charakteryzującą się najwyższą prędkością detonacji spośród wszystkich zastosowanych. Ponadto, można zaobserwować także małe sferyczne pustki (pory) znajdujące się nie tylko w obszarze sąsiadującym bezpośrednio z osiowym otworem (rys. 6b – test P11), ale także w obszarach oddalonych od osi (rys. 6c – test P3). Pustki te są prawdopodobnie następstwem występowania tzw. gorących punktów (*ang. hot spots*) w trakcie wybuchowego zagęszczania cząstek proszku. Gorące punkty są z kolei konsekwencją zamknięcia w przestrzeniach międzycząstkowych powietrza i udarowej jego kompresji. To powoduje wydzielenia dużej porcji ciepła wywołującego lokalne przetopienia materiału spieku i zwiększenia prężności powietrza, które utrudnia konsolidację cząstek proszku. Uwagę również zwraca regularność ułożenia pustek, które tworzą wydłużone struktury z wyraźnie uprzywilejowaną kierunkowością, wskazującą prawdopodobnie na początki tworzenia się tzw. pasm ścinania adiabatycznego (*ang. Adiabatic Shear Bands*). Ponadto na rys. 6c można zauważyć wyraźną różnicę w charakterze połączenia materiału rurki ze spiekem. W przypadku zagęszczania w warunkach testu P3 zachodzącego przy mniejszej prędkości detonacji, w porównaniu do próbki P11, granica ta jest ostra, nieregularna i bez widocznej strefy przejściowej. Odminną strukturę wykazuje natomiast granica rurka-spiek próbki z testu P11. Granica ta jest szersza, a jej materiał różni się od materiału sąsiadujących obszarów, co może świadczyć o stopieniu się (zgrzewaniu) materiału rurki z proszkiem miedzi.

Ostatnimi badaniami mającymi na celu ocenę właściwości fizyko-mechanicznych spieku miedzi otrzymanego wybuchowo, były testy wytrzymałościowe w warunkach quasi-statycznego i udarowego ściskania. Przykładowe krzywe ściskania do próbek testu P5 i P11 oraz, w celach porównawczych, dla miedzi litej gatunku M1E przedstawiono na rys. 7. Z kolei wyznaczone wartości umownej granicy plastyczności $R_{0,2}$ dla wszystkich badanych próbek zestawiono na rys. 8.



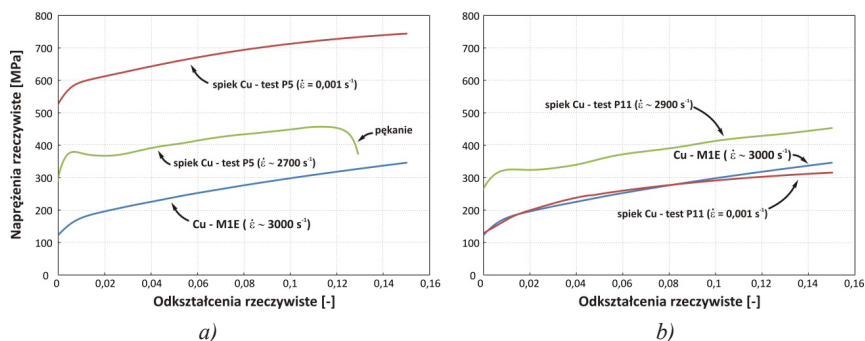
Rys. 7. Krzywe ściskania quasi-statycznego litej miedzi M1E i próbek spieku miedzi otrzymanych wybuchowo w warunkach testu: a) P5; b) P11



Rys. 8. Umowna granica plastyczności $R_{0,2}$ spieku miedzi otrzymanych w różnych warunkach wybuchowego zagęszczania oraz miedzi litej M1E

Wyniki statycznych badań wytrzymałościowych potwierdzają wnioski sformułowane wcześniej, dotyczące przyczyn zróżnicowanego stopnia konsolidacji proszku miedzi. W przypadku próbek o wysokiej granicy plastyczności $R_{0,2}$ (np. dla testów od P4 do P7) prasowanie wybuchowe ograniczyło się do zagęszczenia i umocnienia odkształceniowego cząstek proszku (rys. 7a). W efekcie otrzymano spieki o wysokiej wytrzymałości (umocnione), ale kruche (o niskiej ciągliwości). Jednakże, kiedy warunki prasowania wybuchowego wywoływały dodatkowo różne efekty cieplne intensyfikujące spieknięcie cząstek proszków oraz ich rekrytalizację, otrzymywano spiek o właściwościach wytrzymałościowych zbliżonych do miedzi litej. Zaznaczyć jednak należy, że granica plastyczności $R_{0,2}$ dla tej grupy spieków (P2, P3, P8, P11 i P13) była zawsze wyższa od granicy plastyczności miedzi M1E ($R_{0,2} = 81$ MPa).

Powyższe stwierdzenia znajdują wyraźne potwierdzenie w wynikach badań wytrzymałościowych w warunkach testu Hopkinsona. Na rys. 9 przedstawiono wybrane wyniki dla reprezentatywnych testów, tj. P5 i P11, które porównano z wynikami testów quasi-statycznych ($\dot{\epsilon} = 0,001$ s⁻¹) i z dynamiczną krzywą umocnienia miedzi litej M1E.



Rys. 9. Porównanie dynamicznych krzywych umocnienia spieku miedzi otrzymanego wybuchowo w warunkach testu P5 (a) i P11 (b) i miedzi litej M1E z analogicznymi krzywymi badań quasi-statycznych

Jak można zauważyć spiek miedzi otrzymany w teście P5 w warunkach dynamicznego odkształcenia zachodzącego z szybkością około $\dot{\epsilon} \sim 2700$ s⁻¹ wykazuje niższe naprężenia plastycznego płynięcia w porównaniu z naprężeniami określonymi w warunkach quasi-statycznych. Dowodzi to, że obciążenie dynamiczne wywołuje obniżenie wytrzymałości, które jest następstwem falowego niszczenia kruchych połączeń pomiędzy cząstkami proszku. Prowadzi to w konsekwencji do osłabienia wytrzymałości próbki i jej pęknięcia (rys. 9a).

Odmienne zachowanie w warunkach dynamicznego obciążenia można stwierdzić dla spieku miedzi otrzymanego w teście P11. Podobnie, jak dla większości metali i stopów metali konstrukcyjnych, spiek ten charakteryzuje się wyższymi naprężeniami plastycznego płynięcia w warunkach udarowych w porównaniu do naprężeń wyznaczonych podczas testów quasi-statycznych. Jest to typowe zachowanie, które dowodzi o trwałym i ciągliwym połączeniu cząstek proszku, gwarantującym dużą plastyczność próbki. W przypadku próbek testu P11, a także i innych o podobnych właściwościach nie stwierdzono pęknięcia próbek podczas prób dynamicznych.

Podkreślenia wymaga jeszcze to, że dynamiczne właściwości mechaniczne spieków miedzi otrzymanych w warunkach testów P2, P3, P8, P11 i P13 odpowiadają dynamicznej charakterystyce mechanicznej miedzi litej M1E (rys. 9b). Przy czym we wszystkich przypadkach spieków miedzi – naprężenia plastycznego płynięcia były wyższe od około 50 MPa do 100 MPa – w porównaniu z miedzią M1E. Należy przypuszczać, że różnice te są głównie efektem odmienności struktur krystalicznych rozpatrywanych materiałów. Spieki miedzi charakteryzują się bowiem drobnoziarnistą strukturą (wielkość ziarna około $5 \div 10$ μm), podczas gdy zastosowana miedź lita posiada stosunkowo duże ziarna (około $100 \div 150$ μm). Relacje wytrzymałościowe pomiędzy ww. materiałami są więc zgodne z prawem Halla-Petcha [8].

4. Wnioski

Wyniki prac doświadczalnych wyraźnie wskazują, że za pomocą techniki wybuchowego prasowania można nie tylko otrzymywać wypraski o dużej gęstości, które po spiekaniu w piecach konwencjonalnych staną się dopiero spiekami, ale jest także możliwe wytworzenie spieków o właściwościach fizyko-mechanicznych przewyższających właściwości materiałów otrzymywanych tradycyjnymi metodami. Powyższy wniosek jest jednakże prawdziwy tylko dla metali lub stopów o charakterystykach materiałowych zbliżonych do miedzi. Przypuszczać należy, że wytworzenie spieków z proszków np. wysokotopliwych metali z zastosowaniem tylko prasowania wybuchowego może okazać się bardzo trudne lub niemożliwe. Przyczyną tego mogą być między innymi różne efekty falowe generowane podczas wybuchowego prasowania, które mogą wywoływać różne uszkodzenia struktury materiału (np. powstawanie otworu osiowego).

Pomimo licznych ograniczeń technologii prasowania wybuchowego oraz konieczności rozwiązania wielu trudności natury technicznej związanych z jej stosowaniem, jest to jednak stosunkowo prosty sposób na produkowanie materiałów inżynierskich o specyficznych cechach, trudnych lub niemożliwych do osiągnięcia konwencjonalnymi metodami. Dotyczy to szczególnie wytwarzania materiałów o budowie nanokrystalicznej [9, 10] lub materiałów kompozytowych zawierających struktury, które są rezultatem najnowszych osiągnięć inżynierii materiałowej (np. grafen).

Literatura

- [1] Powers T. Michael, Lavernia J. Enrique, Groza R. Joanna, Shackelford F. James. 2007. *Materials Processing Handbook*. CRC Press, ISBN 9780849332166.
- [2] *ASM Handbook, Volume 7: Powder Metallurgy*. 2015. ASM International, ISBN 978-1-62708-087-3.
- [3] Dyja Henryk, Maranda Andrzej, Trębiński Radosław. 2001. *Zastosowanie technologii wybuchowych w inżynierii materiałowej*. Częstochowa: Wyd. Wydziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Politechniki Częstochowskiej, ISBN 83-87745-11-1.
- [4] Babul Wiktor. 1980. *Odształcenie metali wybuchem*. Warszawa: WNT.
- [5] Trębiński Radosław. 1992. *Teoretyczne podstawy projektowania układów wybuchowych do dynamicznej syntezy materiałów supertwardych*. Warszawa: Wyd. Wojskowej Akademii Technicznej.
- [6] Chen W. Weinong, Song Bo. 2011. *Split Hopkinson (Kolsky) bar. Design, testing and applications*. Springer, ISBN 978-1-4419-7982-7.
- [7] Janiszewski Jacek. 2012. *Badania materiałów inżynierskich w warunkach obciążenia dynamicznego*. Warszawa: Wyd. Wojskowej Akademii Technicznej, ISBN 978-83-62954-34-6.
- [8] Dobrzański A. Leszek. 2002. *Podstawy nauki o materiałach i materiałoznawstwo*. Warszawa: WNT, ISBN 8320432499.
- [9] Farinha A. Rita, Mendes Ricardo, Baranda Jose, Calinas Rosa, Vieira M. Teresa. 2009. "Behavior of explosive compacted/consolidated of nanometric copper powder". *J. Alloys Compd.* 483 (1-2): 235-238.
- [10] Zhanlei Wang, Xiaojie Li, Jianqiao Zhu, Fei Mo, Chunfeng Zhao, Lihe Wang. 2010. "Dynamic consolidation of W-Cu nanocomposites from W-CuO powder mixture". *Mater. Sci. Eng. A* 527: 6098-6101.