



## Badania odporności na zużycie ściernie segmentów metaliczno-diaamentowych otrzymanych metodą SPS

### Wear resistance of the diamond-impregnated specimens fabricated using the SPS process

ELŻBIETA BĄCZEK  
PIOTR PUTYRA  
MARCIN PODSIADŁO  
BARBARA STANIEWICZ-BRUDNIK\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.8-9.116>

Prezentowane wyniki badań właściwości tribologicznych materiałów narzędziowych w procesie szlifowania materiałów kamiennych. Otrzymane spieki metaliczno-diaamentowe homogenizowano w Speed-Mixerze i spiekano metodą SPS (*spark plasma sintering*). Materiał osnowy stanowiły proszki: brąz cynowy Cu-Sn (NAM-40 80/20 z zawartością 20% mas. Sn) oraz proszek żelaza z dodatkiem 20% mas. brązu Cu-Sn. Otrzymane materiały poddano badaniom: gęstości pozornej metodą hydrostatyczną, twardości sposobem Rockwella z wykorzystaniem skali B oraz odporności na zużycie ściernie. **SŁOWA KLUCZOWE:** narzędzia metaliczno-diaamentowe, osnowa, SPS, odporność na zużycie ściernie

*This paper presents the tribological properties of the diamond-impregnated specimens in the grinding process of sandstone materials. Obtained metallic-diamond composites were homogenized in Speed Mixer and sintered by SPS (spark plasma sintering). The matrix was prepared from: Cu-Sn (NAM-40 80/20 containing 20% wt. Sn) and Fe-Cu-Sn powders. After consolidation the diamond-impregnated specimens were tested for density using the hydrostatic method, Rockwell's hardness using B scale and for wear rate on abrasive sandstone using a testing rig specially designed to simulate the tool application conditions.*

**KEYWORDS:** metallic-diamond tools, matrix, SPS, wear resistance

Narzędzia metaliczno-diaamentowe znajdują szerokie zastosowanie w procesach kształtowania użytkowego materiałów inżynierskich, w różnych sektorach przemysłowych. Narzędzia diaamentowe do cięcia i szlifowania kamienia naturalnego stanowią grupę wyrobów, której zastosowanie dynamicznie rośnie. Ich podstawowym składnikiem jest materiał ścierny (diaament) oraz osnowa

metaliczna. Autorzy literatury fachowej podkreślają znaczenie właściwego doboru materiału osnowy i technologii wytwarzania tych narzędzi.

Podstawowymi technologiami wytwarzania narzędzi metaliczno-diaamentowych jest spiekanie swobodne oraz prasowanie na gorąco. Segmenty metaliczno-diaamentowe można także wytwarzać m.in.: metodą formowania detonacyjnego [1], wtryskowego PIM (*powder injection moulding*) [2] lub też metodą SPS (*spark plasma sintering*) [3, 4].

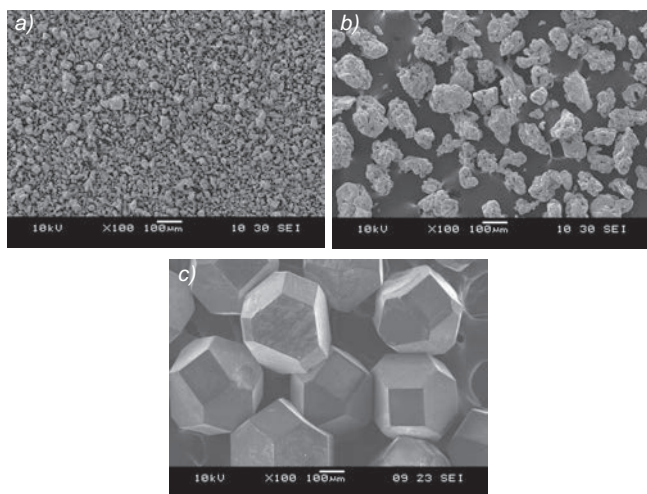
Proces nagrzewania w metodzie SPS jest realizowany w wyniku przepływu prądu przez spiekany materiał. Wokół miejsc kontaktu cząstek kształtują się „szybki” [5], które stopniowo się rozrastają. Zjawisku temu towarzyszy odkształcenie plastyczne [6]. W metodzie SPS tlenkowe powierzchnie cząstek proszków są znacznie łatwiej redukowane (głównie przez występującą punktowo wysoką temperaturę, która powoduje ich odparowanie). Również szybciej (tzn. w niższych temperaturach) w porównaniu z tradycyjnymi procesami spiekania następuje zjawisko aktywacji spiekania. Pozwala to m.in. na przeprowadzenie procesu w temperaturze niższej o 200–500°C niż w klasycznych metodach i w znacznie krótszym czasie. Czas nagrzewania materiału wraz z jego izotermicznym spiekaniem w tej metodzie zawiera się zwykle w zakresie 5–20 min. Pozwala to na spiekanie nanokrystalicznych proszków bez rozrostu ziarna. W porównaniu np. z metodą izostatycznego prasowania na gorąco zapotrzebowanie na energię elektryczną w procesie SPS jest o ok. 20–30% mniejsze, co jest bardzo istotne ze względów ekonomicznych [7].

Badania przeprowadzono w związku z rosnącym zapotrzebowaniem rynku na narzędzia diaamentowe przeznaczone do cięcia i szlifowania materiałów kamiennych. Głównym celem prac było określenie mechanizmów zużycia i właściwości materiałów osnowy w warunkach odzwierciedlających ich rzeczywiste funkcjonowanie. Opracowane materiały mogą stanowić alternatywę dla materiałów powszechnie wykorzystywanych do produkcji profesjonalnych narzędzi metaliczno-diaamentowych (Co, Ni).

\* Mgr inż. Elżbieta Bączek (elzbieta.baczek@ios.krakow.pl), dr inż. Piotr Putyra (piotr.putyra@ios.krakow.pl), inż. Marcin Podsiadło (marcin.podsiadlo@ios.krakow.pl), dr inż. Barbara Staniewicz-Brudnik (barbara.brudnik@ios.krakow.pl) – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania

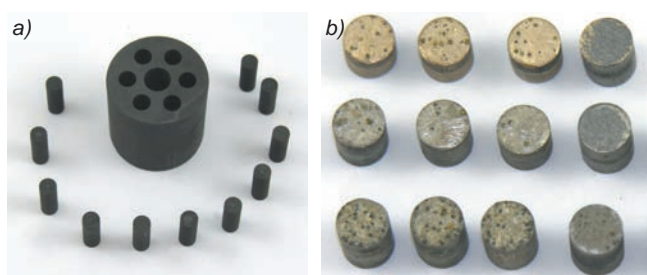
## Metodyka i wyniki badań

Próbki do badań wykonano z elementarnych proszków brązu cynowego, żelaza redukowanego i diamentu syntetycznego. Na zdjęciach SEM widać kształt cząstek wykorzystanych proszków (rys. 1).



Rys. 1. Obraz elektroniczny proszku: a) brązu cynowego Cu-Sn NAM-40 80/20 z zawartością 20% mas. Sn; b) żelaza z gatunku NC100.24; c) diamentu syntetycznego z gatunku LS4820+ o granulacji 40/50 US mesh

Mieszanki proszków metaliczno-diaamentowych przygotowano z dwóch materiałów osnowy: Cu-Sn (mieszanka A1), Fe-Cu-Sn (mieszanka A2) oraz diamentu syntetycznego z gatunku LS4820+ o granulacji 40/50 mesh i koncentracji 20 (5% obj.) ujednorodniano poprzez mieszanie w homogenizatorze Speed-Mixer DAC 400.1 FVZ. Przygotowane mieszanki spiekano metodą SPS w specjalnie zaprojektowanej matrycy (rys. 2a) umożliwiającej jednoczesne spiekanie sześciu próbek o nominalnych wymiarach  $\varnothing 7 \times 7$  mm (rys. 2b). Bez względu na skład mieszanki poddawanej konsolidacji proszek wytrzymywano przez 2 min w maksymalnej temperaturze i pod ciśnieniem 35 MPa. Dla każdego materiału temperaturę prasowania dobierano w taki sposób, aby otrzymać spieki o porowatości nie większej niż 5%. Proces spiekania metodą SPS przeprowadzono w atmosferze argonu z wykorzystaniem urządzenia SPS HP 5 firmy FCT.



Rys. 2. Grafitowa matryca do spiekania segmentów metaliczno-diaamentowych o średnicy  $\varnothing 7$  mm (a); segmenty otrzymane metodą SPS (b)

Skład spieków oraz parametry procesu spiekania przedstawiono w tabl. I.

Wszystkie spieki poddano pomiarom gęstości (metodą ważenia w powietrzu i w wodzie), twardości oraz odporności na zużycie ścierne, wykorzystując szlifierko-polerkę RotoPol-21 firmy Struers. Pomiar odporności segmentów metaliczno-diaamentowych na zużycie ścier-

TABLICA I. Skład mieszanek oraz warunki spiekania metodą SPS

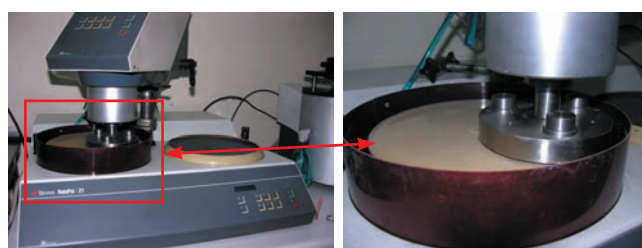
Oznaczenie mieszanki	Skład mieszanki, % obj.	Parametry procesu spiekania			
		Prędkość nagrzewania, °C/min	Temp., °C	Czas, min	Ciśnienie, MPa
Cu-Sn	95% Cu-Sn 5% diamentu syntetycznego	100	550	2	35
Fe-Cu-Sn	95% Fe-Cu-Sn 5% diamentu syntetycznego		750		

ne polegał na jednoczesnym przesuwaniu trzech cylindrycznych próbek względem tarczy ścierającej wykonanej z piaskowca Śmiłów, z zastosowaniem wody jako czynnika chłodzącego i wmywającego ścierne produkty obróbki piaskowca. Segmenty umieszczano w stalowych obejmach, które mocowano w standardowym uchwycie próbek, znajdującym się na wyposażeniu głowicy RotoForce-4. Wybrane właściwości fizyczne i mechaniczne przedstawiono w tabl. II. Stanowisko do badań odporności na zużycie ścierne segmentów metaliczno-diaamentowych przedstawiono na rys. 3.

TABLICA II. Wyniki pomiarów gęstości i twardości spieków\*

Oznaczenie mieszanki	Skład mieszanki, % obj.	Uśredniona wartość gęstości, g/cm <sup>3</sup>	Uśredniona wartość twardości, HRB
Cu-Sn	95% Cu-Sn 5% diamentu syntetycznego	8,69 ±0,04	99 ±1,04
Fe-Cu-Sn	95% Fe+Cu-Sn 5% diamentu syntetycznego	7,76 ±0,04	82 ±0,82

\* Przedziały niepewności oszacowano dla poziomu ufności  $1 - \alpha = 0,9$

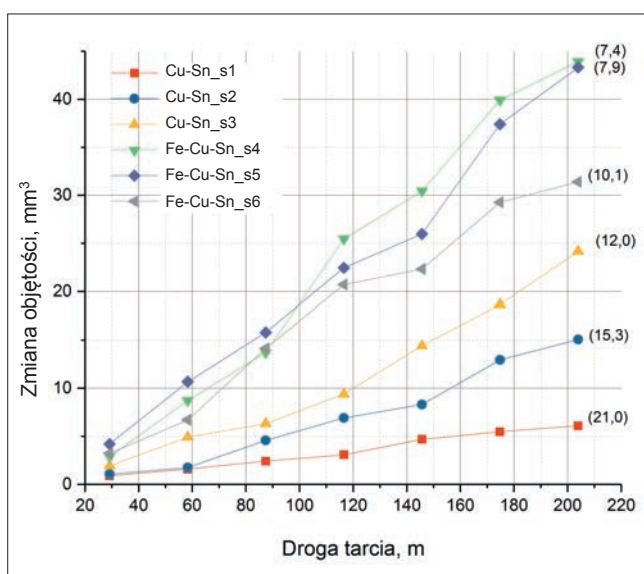


Rys. 3. Stanowisko do badań odporności na zużycie ścierne segmentów metaliczno-diaamentowych wraz z kamienną tarczą ścierającą

Podczas każdego dwudziestosekundowego cyklu pomiarowego segmenty indywidualnie dociskano do kamiennej tarczy ścierającej z siłą  $F = 20$  N. Prędkość obrotowa tarczy wynosiła 150 obr/min. W ustalonych warunkach testu średnia prędkość liniowa próbki wynosiła 1,72 m/s. Po każdym dwudziestosekundowym cyklu pomiarowym segmenty dokładnie myto w etanolu (w płuczce ultradźwiękowej), suszono i ważono z dokładnością do 0,1 mg. Po obliczeniu utraty objętości poddawano je obserwacji z użyciem mikroskopu cyfrowego Dino Lite Digital Mikroskopu Dremler, w powiększeniu 40 $\times$ , w celu określenia liczby kryształów diamentu na roboczej powierzchni segmentu. Wyniki badań zestawiono w tabl. III i na rys. 4.

**TABLICA III. Ubytek objętości segmentu i liczba kryształów diamentu na jego roboczej powierzchni po kolejnych cyklach pomiarowych oraz średnia liczba kryształów diamentu na powierzchni segmentu**

Materiał osnowy i numer segmentu		Zmiana objętości (mm <sup>3</sup> ) i liczba kryształów diamentu – w nawiasie – w funkcji drogi tarcia (m)							Średnia liczba kryształów diamentu $\bar{D}$
		29,13	58,25	87,38	116,51	145,64	174,76	203,89	
Cu-Sn	s1	0,90 (18)	1,60 (17)	2,43 (19)	3,08 (21)	4,69 (23)	5,48 (24)	6,10 (25)	21,0
	s2	1,09 (14)	1,76 (16)	4,59 (15)	6,92 (14)	8,32 (18)	12,95 (16)	15,09 (14)	15,3
	s3	1,94 (11)	4,93 (11)	6,33 (8)	9,40 (12)	14,43 (13)	18,69 (14)	24,18 (15)	12,0
Fe-Cu-Sn	s4	2,90 (7)	8,73 (9)	13,72 (6)	25,48 (9)	30,46 (8)	39,92 (7)	43,92 (6)	7,4
	s5	4,21 (11)	10,68 (10)	15,81 (10)	22,47 (9)	25,98 (8)	37,42 (5)	43,32 (2)	7,9
	s6	3,24 (9)	6,71 (8)	14,15 (9)	20,74 (10)	22,34 (11)	29,29 (12)	31,42 (12)	10,1



Rys. 4. Zmiana objętości segmentów w funkcji drogi tarcia (w nawiasie podano średnią liczbę kryształów diamentu na roboczej powierzchni segmentu)

## Analiza wyników

Przyjęte parametry procesu spiekania umożliwiły uzyskanie spieków o wysokiej gęstości, zbliżonej do gęstości teoretycznej (tabl. II). Twardość otrzymanych spieków mieściła się w zakresie 82÷99 HRB. Niższe wartości twardości odnotowano dla spieków na bazie żelaza.

Podczas badań tribologicznych porównano odporność na zużycie ściernie spieków metaliczno-diaamentowych na bazie Cu-Sn i Fe-Cu-Sn. Spieki wyprodukowane na bazie miedzi charakteryzowały się wyższą odpornością na ścieranie od spieków na bazie żelaza. Badania postępu zużycia się segmentów metaliczno-diaamentowych wskazały na duże znaczenie koncentracji i wielkości kryształów diamentu oraz sposobu ich rozmieszczenia w objętości segmentu, co pośrednio wynikało z wpływu procesu homogenizacji mieszanki.

Z pomiarów wynika, że na chwilową szybkość zużycia się segmentu podczas obróbki materiałów o właściwościach ściernych najsilniej wpływa liczba kryształów diamentu przypadających na jednostkową, roboczą powierzchnię segmentu. Najmniej zużyły się segmenty, w których większa liczba kryształów diamentu brała udział w obróbce piaskowca (tabl. III, rys. 4).

Uzyskane wyniki badań potwierdzają korzyści wynikające z zastosowania metody SPS do otrzymywania

narzędzi metaliczno-diaamentowych przeznaczonych do cięcia i szlifowania materiałów kamieniarskich. Możliwe jest otrzymanie materiału o lepszych właściwościach fizyko-mechanicznych w niższej temperaturze spiekania (200÷500°C) i w znacznie krótszym czasie (5÷20 min) [8].

## Wnioski

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- Wykorzystanie metody SPS pozwoliło uzyskać materiały o gęstości zbliżonej do gęstości teoretycznej i o wysokiej twardości.
- Wyniki badań tribologicznych uwiarydliły wpływ koncentracji ziarna diamentowego na stopień zużycia segmentów.
- Najlepszym połączeniem właściwości fizycznych i mechanicznych charakteryzowały się materiały na bazie brązu cynowego.
- Badane materiały spełniają kryteria zastosowania ich do produkcji narzędzi diamentowych przeznaczonych do materiałów kamieniarskich.

**Prace realizowane w ramach badań prowadzonych w IZTW ze środków na rozwój potencjału badawczego – DS.16-1.2 pt.: „Narzędzia (ściernice) metaliczno-diaamentowe o nanokryształicznej osnowie spiekane metodą SPS/FAST”.**

## LITERATURA

1. Novikov N.V., Maistrenko A.L., Trefilov V.I., Kovtun V. "Structure and properties of shock-wave sintered diamond composites". *Industrial Diamond Review*. 51, 1 (1991): s. 20–23.
2. Risso L., Vicenzi B., Bernieri S. "Improved cutting performance of diamond beads by means of innovative shape". *Industrial Diamond Review*. 67, 4 (2007): s. 28–30.
3. Tillmann W., Kronholz C., Ferreira M. "Novel current induced short-time sintering processes for the production of diamond tools". *Proceedings of Euro PM2009 Congress & Exhibition*. Copenhagen, Denmark, 2009, s. 796–803.
4. Schmidt J., Knotte A., Armbrüster M., Weißgärber Th., Kieback B. "Spark Plasma Sintering of diamond impregnated wire saw beads". *Applicazioni & Tecnologia*. 64 (2011): s. 35–40.
5. Jaworska L., Putyra P., Wyżga P., Figiel P. „Nowoczesne metody spiekania”. *Annales Universitatis Paedagogicae Cracoviensis*. 6 (2013): s. 35–40.
6. Michalski A., Siemaszko D. „Impulsowo plazmowe spiekanie nanokryształicznych węglików WC-12Co”. *Inżynieria Materiałowa*. 3 (2006): s. 629.
7. Hebda M. „Spark Plasma Sintering – nowa technologia konsolidacji materiałów proszkowych”. *Mechanika. Czasopismo Techniczne*. 6-M, 11 (2012).
8. Sprawozdanie IZTW DS.14-3.1 – praca niepublikowana. ■