



A XV-a Conferință internațională – multidisciplinară
„Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”
SEBEȘ, 2015

CERCETARE PILOT PENTRU PRODUCEREA CONTACTELOR ELECTRICE PENTRU CURENȚI INTENȘI PRIN METALURGIA PULBERILOR

George ARGHIR, Liviu Brândușan

PILOT RESERARCH FOR PRODUCTION OF ELECTRICAL CONTACTS FOR STRONG CURRENTS BY POWDER METALLURGY

There were experienced three pilot versions for electrical contacts for strong currents, W – Cu, by powder metallurgy. Based on these it was selected the following variant: Cu matrix composite reinforced with W, starting from the powder: W - 50.18 mass %, Ni - 1.02 %, Cu 48.06 %, and 0.74 % zinc stearate. 8 GPa pressed, sintered at 875 °C for 15 minutes, then infiltrated with Cu to fill the pores, resulting in a product that has a density of 11.738 kg/m³, similar to the theoretical density. It is noted that often remain additions of no infiltrated Cu and sometimes may appear craters in place of infiltration. It is preferred the version with as little as possible infiltrated Cu.

Keywords: sintered electrical contacts, W-Cu

Cuvinte cheie: contacte electrice sinterizate, W-Cu

1. Introducere

Contactele electrice pentru curenți intensi sunt necesare în centrale electrice în cadrul contactorilor ce realizează cuplarea și decuplarea producătorului de energie electrică la linia de transport a energiei electrice. Ele lucrează în condiții solicitante: tensiune electrică ridicată și curenți de mare intensitate – intensi. Sunt imersionate în ulei

de transformator (care să stingă flamele ce apar la cuplare și decuplare, pentru izolare electrică și răcire), iar materialul conține W (pentru a rezista la temperaturi ridicate ale flamelor) și Cu (pentru conductibilitate electrică și termică). Contactele trebuie să conțină elementul conductor (Cu) cât mai mult, pe o structură de element rezistent la temperaturi înalte (W) suficient de rezistentă mecanic.

Din diagrama de faze [1] rezultă că în stare solidă la temperatura mediului ambiant (25 °C) Cu și W nu formează o soluție solidă, ele se separă. Depășirea segregării se poate face numai prin metalurgia pulberilor. Segregarea în stare solidă, la temperatura sub cea de topire a Cu (1085 °C [1]) se datorează temperaturilor diferite de solidificare a Cu și W (3422 °C [1]), dar și structurilor cristaline extrem de diferite: Cu – CFC, respectiv W – CVC și parametrii cristalografici, a, 361,46 pm, respectiv, 316,52 pm [1].

Materialul compozit format din W și Cu are proprietăți deosebite rezistă la temperatură înaltă și în același timp asigură conductivitate termică și electrică ridicată. La acestea se mai adaugă: rezistență excelentă la arcul electric, rezistență mecanică superioară, prelucrabilitate prin așchiere bună și dilatare termică redusă [2].

Sunt cunoscute contactele electrice folosite la întrerupătoare în care conținutul de Cu este de 10, 20, 30 % masă [2]. Se intenționează producerea de contacte electrice pentru întrerupătoare de curenți intenși la medie și înaltă tensiune care să conțină 50 % masă Cu și 50 % masă W. Pulberea de Cu este produsă în România, iar pulberea de W este din import.

Utilizarea pulberii de Cu indigene reduce prețul de cost și ajută la îmbunătățirea conductibilității electrice și termice.

Introducerea unei mici cantități de Ni care se dizolvă în W, sau care dizolvă W, favorizează aderarea Cu la W. Ni poate dizolva până la 27 % masă W la temperatura mediului ambiant [3], prezentând o mare solubilitate a W, dizolvă legăturile W-W formate în timpul sinterizării solide [4] favorizând sinterizarea W. Aceasta în ciuda diferențelor mari ale structurilor cristaline ale Ni (CFC, a = 352,39 pm) [5] de a W (CVC, a = 316,52 pm [1]).

Contactele trebuie să aibă o densitate cât mai ridicată, întrucât o masă mare mărește capacitățile benefice.

În prezentul articol e descrisă tehnologia pilot a formării contactelor electrice prin metalurgia pulberilor pentru întrerupătoare de curenți intenși, la medie și înaltă tensiune folosite în întrerupătoare, pentru un beneficiar.

2. Tehnologia realizării probelor

Sunt posibile două variante tehnologice:

1. se realizează o structură de W, care se infiltrează cu Cu sau
2. se realizează un compozit în care materialul de bază este Cu cu armătură de W.

Calculul densității teoretice a unui compozit, ρ_{tc} , compus din i materiale (amestec mecanic), fracția masică x_i având densitatea ρ_i , la care

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1 \quad \text{se efectuează considerând } \rho_{tc} = \frac{m}{v}, \text{ masa compozitului } m = \sum_{i=1}^n m_i \text{ și volumul compozitului } v = \sum_{i=1}^n v_i \text{ rezultă:}$$
$$\rho_{tc} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n x_i \frac{1}{\rho_i}} \quad (1)$$

Relația (1) se aplică în cazul corpurilor fără pori.

2.1. Structură de W infiltrată cu Cu

Pentru varianta 1 – o structură de W în care se infiltrează Cu - s-a plecat de la materia primă, **Șarja 1**, ce conține pulbere: 490 g W (90,07 % masă), 10 g Ni (1,84 %), 40 g Cu (7,35 %) și 4 g stearat de zinc (0,74 %) (bazat pe unele cercetări anterioare). Densitatea compactă a șarjei 1 este de 15.347 kg/m³ (folosită la calcul porozității presatelor) și respectiv 17.563 kg/m³ fără stearat de zinc (folosită la calculul porozității sinterizatorilor).

Pulberea s-a introdus într-un borcan (0,5 l) al omogenizatorului spațial TURBULA, împreună cu 10 bile cu diametrul de 7 mm, omogenizându-se 2 h.

Presarea s-a făcut într-o matriță circulară cu suprafață de 1 cm², la presiunile (p), tabelul 1 (Șarja 1. Presiunea, densitatea și porozitatea presatelor). Fiecare rezultat este media a cinci probe.

Tabelul 1

Nr. crt.	p, GPa	ρ , kg/m ³	P, %
1	0,5	9.680	44,71
2	0,8	10.035	42,48
3	1	10.095	42,13
4	2	10.848	37,81
5	3	11.391	34,70

6	5	12.245	29,80
7	8	13.136	24,69

S-au prezentat valorile pentru densitate (ρ) și porozitate (P). S-au considerat densitățile: $\rho_W = 19.300 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{Ni} = 8.902 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{Cu} = 8.960 \text{ kg/m}^3$ [6], $\rho_{\text{stearatZn}} = 900 \text{ kg/m}^3$ [7]. Masa unui presat a fost în medie 11,2 g.

Măsurătorile dimensionale s-au făcut cu un micrometru cu precizia de 0,005 mm și masa s-a măsurat cu o balanță cu precizia 0,0001 g.

Se remarcă faptul că odată cu creșterea presiunii de la 0,5 GPa la 8 GPa crește și densitatea presatelor de la 9.680 kg/m^3 la 13.136 kg/m^3 , iar porozitatea scade de la 44,71 % la 24,69 %.

2.2. Compozit având Cu ca materialul de bază armat cu W

Pentru varianta 2 se realizează un compozit în care materialul de bază este Cu cu armare de W.

Șarja 2a conține pulbere: 125,56 g W (50,18 % masă), 2,56 g Ni (1,02 %), 120,25 g Cu (48,06 %) și 1,83 g stearat de zinc (0,73 %) Densitatea compactă a șarjei 2a este de 11.249 kg/m^3 și respectiv 12.378 kg/m^3 fără stearat de zinc.

Presările s-au efectuat ca la șarja 1 rezultatele sunt redade în tabelul 2 (Șarja 2a. Presiunea, densitatea și porozitatea presatelor). S-a redus numărul de presiuni utilizate, eliminându-se 0,8 și 3 tf/cm^2 , rezultatele nefiind mult diferite față de cele între care sunt intercalate. Masa unui presat a fost în medie 10,7 g.

Tabelul 2

Nr. crt.	p, GPa	ρ , kg/m^3	P, %
1	0,5	7.460	33,68
2	1	8.147	27,58
3	2	8.873	21,12
4	5	9.951	11,54
5	8	10.438	7,21

Și în acest caz se remarcă creșterea densității de la 7.460 kg/m^3 la 10.438 kg/m^3 și scăderea porozității de la 33,68 % la 7,21 % cu creșterea presiunii de la 0,5 GPa la 8 GPa, însă mai accentuat, Cu fiind mai plastic ca W.

Șarja 2b conține pulbere: 100 g W (41,36 %), 20 g Ni (8,27 %), 120 g Cu (49,63 %) și 1,8 g stearat de zinc (0,74 %). Densitatea compactă a șarjei 2b este de 10.601 kg/m³ și respectiv 11.613 kg/m³ fără stearat de zinc.

Presările s-au efectuat ca la șarja 1 rezultatele sunt redată în tabelul 3 (Șarja 2b. Presiunea, densitatea și porozitatea presatelor). Masa unui presat a fost în medie 10,3 g.

Tabelul 3

Nr. crt.	p, GPa	ρ , kg/m ³	P, %
1	0,5	6.762	36,21
2	1	7.407	30,13
3	2	8.152	23,10
4	5	9.283	12,43
5	8	9.718	8,33

Se remarcă aceeași creștere a densității și aceeași scădere a porozității însă mai redusă ca la șarja 2a rezultat al creșterii conținutului de Ni de la 1,02 % la 8,27 %, în detrimentul conținutului de W, pe când conținutul de Cu rămânând același.

2.3. Sinterizarea presatelor

Presatele din tabellele 1 (șarja1), 2 (șarja 2a) și 3 (șarja 2b) au fost supuse sinterizării: la temperatura de 875 °C, durată: 15 minute, atmosfera: endogaz cu temperatura de rouă 4 °C.

Presatele s-au așezat pe un strat de electrocorindon EC 120. Încălzirea și răcirea s-a făcut într-un cuptor cu cameră.

Rezultatele sinterizării sunt redată în tabellele 4 (Șarja 1. Presiunea, densitatea, porozitatea sinterizatelor, densitatea la care se ajunge când porii sunt umpluți cu Cu (ρ_{prescris}) și cantitatea de Cu de adăugat (M_{Cu})), 5 (Șarja 2a. Presiunea, densitatea, porozitatea sinterizatelor, densitatea la care se ajunge când porii sunt umpluți cu Cu (ρ_{prescris}) și cantitatea de Cu de adăugat (M_{Cu})) și 6 (Șarja 2b. Presiunea, densitatea, porozitatea sinterizatelor, densitatea la care se ajunge când porii sunt umpluți cu Cu (ρ_{prescris}) și cantitatea de Cu de adăugat (M_{Cu})).

Tabelul 4

Nr. crt.	p, GPa	ρ , kg/m ³	P, %	ρ_{prescris} , kg/m ³	M_{Cu} , g
1	0,5	9.506	45,87	13.581	4,4

2	0,8	9.830	44,03	13.739	4,3
3	1	9.889	43,69	13.768	4,2
4	2	10.708	39,03	14.165	3,6
5	3	11.231	35,54	14.419	3,1
6	5	12.087	31,18	14.836	2,5
7	8	12.935	26,35	15.248	2,4

Stearatul de zinc folosit pentru presare este eliminat la sinterizare. În porii presatelor rămâne porozitatea P, în care se poate infiltra o cantitate de Cu.

După sinterizare se remarcă, în medie, densitatea ρ mai scăzută ca în cazul presatelor la orice presiune, cu 1,59 %, iar porozitatea crește cu 1,34 %, rezultat al expandării în timpul sinterizării, dar și al părăsirii compactului de către stearatul de zinc.

Adăugând cantitatea de Cu, M_{Cu} , în locul porozității, rezultă o nouă densitate $\rho_{prescris}$ de interes în cercetare. Cantitatea de Cu adăugată prin infiltrație este proporțională porozității, scăzând odată cu aceasta de la 4,4 g la respectiv 2,4 g, iar densitatea rezultantă crește de la 13.581 kg/m³ la respectiv 15.248 kg/m³, rezultat al densității inițiale, care se apropie de cea teoretică (17.563 kg/m³).

Tabelul 5

Nr. crt.	p, GPa	ρ , kg/m ³	P, %	$\rho_{prescris}$, kg/m ³	M_{Cu} , g
1	0,5	7.434	39,94	10.973	5,1
2	1	8.157	34,10	11.169	4,0
3	2	8.841	28,57	11.354	3,0
4	5	9.805	20,79	11.615	2,0
5	8	10.250	17,19	11.738	1,4

Se remarcă scăderea densității în medie cu 1,00 %, porozitatea crește cu 7,90 %, cantitatea de cupru scade de la 5,1 g la respectiv 1,4 g și densitatea $\rho_{prescris}$ crește de la 10.973 kg/m³ la respectiv 11.738 kg/m³, apropiindu-se de cea teoretică (12.378 kg/m³).

Tabelul 6

Nr. crt.	p, GPa	ρ , kg/m ³	P, %	$\rho_{prescris}$, kg/m ³	M_{Cu} , g
1	0,5	6.538	43,70	10.416	6,0
2	1	7.109	38,78	10.543	5,0
3	2	7.747	33,29	10.685	3,9
4	5	8.658	25,45	10.888	2,6
5	8	8.926	23,14	10.948	2,2

Și în acest caz se remarcă scăderea densității în medie cu 5,67 %, porozitatea crește cu 10,83 %, cantitatea de cupru scade de la 6,0 g la respectiv 2,2 g și densitatea ρ_{prescris} crește de la 10.416 kg/m³ la respectiv 10.948 kg/m³, apropiindu-se de cea teoretică (11.613 kg/m³).

3. Discutarea rezultatelor

■ S-a experimentat variante pilot pentru realizarea contactelor electrice pentru curenți intensi, W - Cu, prin metalurgia pulberilor materializându-se două variante: 1. o structură de W, care se infiltrează cu Cu (pulbere: W – 90,07 % masă, Ni – 1,84 %, Cu 7,35 %) și 2. Un compozit cu matrice de Cu armat cu W în care se infiltrează suplimentar Cu (subvarianta a: W - 50,18 %, Ni – 1,02 %, Cu 48,06 %, subvarianta b: W – 41,36 %, Ni – 8,27 %, Cu – 49,63 %). În toate cazurile s-a adăugat stearat de zinc (0,74 %).

■ Pentru structura de W s-a utilizat presiuni de compactizare de 0,5, 0,8, 1, 2, 3, 5 și 8 tf/cm², realizându-se densități de la 9.680 kg/m³ (0,5 GPa) până la respectiv 13.136 kg/m³ (8 GPa) aproape liniar, iar porozitatea scade corespunzător de la 44,71 % la respectiv 24,69 %. Se remarcă efectul benefic al măririi presiunii, dar și al stearatului de zinc ce reduce frecarea atât între matriță și pulbere, cât și în masa de pulbere ducând la scăderea porozității. La sinterizare scade densitatea cu 1,59 %, iar porozitatea crește cu 1,34 %. Înfiltrând o cantitatea de Cu (4,4 - 2,4 g) în porozitate, crește densitatea de la 13.581 kg/m³ la 15.248 kg/m³, ce se apropie de densitatea teoretică (17.563 kg/m³).

■ Pentru compozitul cu matricea de Cu, subvarianta a, pulberea presată la presiuni de 0,5 – 8 GPa prezintă densități de la 7.460 kg/m³ la 10.438 kg/m³ și porozității de la 33,68 % la 7,21 %, Cu fiind mai plastic ca W. Prin sinterizare scade densitatea 1,00 %, porozitatea crește cu 7,90 %, cantitatea de cupru de adăugat scade de la 5,1 g la 1,4 g și densitatea crește de la 10.973 kg/m³ la 11.738 kg/m³, apropiindu-se de cea teoretică (12.378 kg/m³).

■ Pentru compozitul cu matricea de Cu, subvarianta b, pulberea a fost presată la presiuni de 0,5 – 8 GPa. Comprimatele prezintă aceeași variație a densității și porozității c subvarianta a. La sinterizare se remarcă scăderea densității în medie cu 5,67 %, porozitatea crește cu 10,83 %, iar cantitatea de cupru adăugată scade de la 6,0 g la 2,2 g și densitatea crește de la 10.416 kg/m³ la 10.948 kg/m³, apropiindu-se de cea teoretică (11.613 kg/m³).

■ În baza cercetărilor pilot se alege varianta tehnologică: compozit cu matrice de Cu armat cu W (subvarianta a) cu plecare de la

pulbere: W - 50,18 % masă, Ni – 1,02 %, Cu 48,06 %, cu 0,74 % stearat de zinc. Presat la 8 GPa, sinterizat la 875 °C, timp de 15 minute, apoi infiltrat cu Cu pentru umplerea porilor, rezultând un produs ce are densitatea de 11.738 kg/m³, apropiată de cea teoretică. Se remarcă faptul că deseori rămân adausuri de Cu neînfiltrate și uneori apar cratere în locul infiltrării Cu. De aceea se preferă varianta cu cât mai puțin Cu infiltrat.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Subramanian, P. R., Laughlin, D, E, *Cu-W (Copper-Tungsten)*, Phase diagrams of binary tungsten alloys, Editors: S. V. Nagender Naidu, P. Rama Rao, Indian Institute of Metals, Calcutta, p. 76-79.
- [2] Böning, M., *Tungsten-Copper for SF6 circuit breakers*, on line [<http://www.plansee.com/en/Products-Electrical-contacts-Tungsten-copper-WCu-58.htm?gclid=CIPIn9ySk8QCFUHltAodxmgAAA>] (06.03.2015, EST 9.10).
- [3] Okamoto, H., *Ni-W (Nickel-Tungsten)*, J. of Phase Equilibria, December 1991, Vol. 12, No. 6, p. 706. ISSN: 1054-9714 (Print) 1054-9714 (Online).
- [4] Yunxin, W., German, R. M., Marx, B., Suri, P., Bollina, R., *Comparison of densification and distortion behaviors of W-Ni-Cu and W-Ni-Fe heavy alloys in liquid-phase sintering*, Journal of Material Science, 38 (2003) p. 2271–2281.
- [5] Arghir, G., Ghergari, L. M., *Cristalografie-Mineralogie, Îndrumător*, Institutul Politehnic din Cluj-Napoca, 1989, p.337.
- [6] * * * *Handbook of Chemistry and Physics*, 53rd Edition, 1972-1973, Editor Weast, R. C., The Chemical Rubber Co., Cleveland, Ohio, 1972, p. B4-B38.
- [7] * * * *Handbook of Chemistry and Physics*, 53rd Edition, 1972-1973, Editor Weast, R. C., The Chemical Rubber Co., Cleveland, Ohio, 1972, p. C397.

Prof. Em. Dr. Ing., Fiz. George ARGHIR
Prof. Dr. Ing. Liviu Brândușan
Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca
membri AGIR