

REZUMAT

al lucrării de doctorat cu titlul

”CERCETARI PRIVIND ELABORAREA UNOR ELECTROZI PENTRU SUDARE PRIN PRESIUNE DIN MATERIALE COMPOZITE CU MATRICE DIN CUPRU”

elaborată de ing. BUF D. MARIA (MICLĂU)

Cercetările care fac obiectul tezei de doctorat sunt axate pe problematica complexă a elaborării electrozilor pentru sudare prin rezistență dub presiune în puncte, cu caracteristici funcționale cât mai ridicate.

În acest cadru este vizată elaborarea de materiale și electrozi din sistemul Cu-Cr și Cu-Cr-W cu compoziții chimice diferite de cele cunoscute și practicate curent pentru obținerea electrozilor comerciali cu utilizare industrială și anume cu conținut de până la 4% Cr comparativ cu limita maximă folosită în prezent de 1% Cr.

Prin creșterea conținutului de crom se preconizează obținerea de electrozi Cu-Cr și Cu-Cr-W cu rezistențe la uzare prin frecare și prin eroziune electrică mai ridicate în condițiile menținerii proprietăților electrice optime pentru îndeplinirea sarcinilor funcționale ale electrozilor destinați sudării în puncte.

Pentru îndeplinirea scopului propus s-au urmărit în cercetare trei obiective principale și anume:

- Elaborarea unor pulberi compozite cu matrice de cupru armată cu Cr respectiv Cr+W;
- Elaborarea prin metalurgia pulberilor a electrozilor din pulberi compozite cu matrice de cupru;
- Analiza comparativă a comportării electrozilor noi cu cei convenționali în procesele de sudare electrică prin presiune în puncte.

În acest context lucrarea de doctorat este structurată în 5 capitole cu următorul conținut:

În **capitolul I** sunt prezentate rezultatele cercetării bibliografice prin care s-a urmărit identificarea tendințelor și a noutăților în cercetările care vizează materialele pentru electrozi și tehnologiile de elaborare ale acestora și, totodată, este definit scopul cercetărilor, sunt stabilite obiectivele și este prezentat itinerariul cercetărilor care fac obiectul tezei de doctorat.

Referitor la materialele utilizate la fabricarea electrozilor pentru sudarea în puncte, în primă instanță este aprofundat sistemul Cu-Cr și sistemul Cu-Cr-Zr, cele două sisteme conținând aliajele folosite aproape exclusiv la scară industrială pentru fabricarea electrozilor. Conform diagramei de echilibru Cu-Cr rezultă că solubilitatea în stare solidă a atomilor de crom în rețeaua cupru este limitată și foarte mică situându-se la valoarea de $0,83 \pm 0,09\%$, ceea ce face ca în

practica curentă adaosul de crom să se situeze la max 1% la elaborarea electrozilor Cu-Cr și Cu-Cr-Zr.

În continuare sunt prezentate procedeele de elaborare a electrozilor pentru sudarea în puncte conform datelor din literatura de specialitate, principala tehnologie de elaborare este turnarea și/sau deformarea plastică, și, în acest cadru tendințele în cercetare sunt de a identifica procedee noi de turnare cum este turnarea electrică sub strat de zgură (Electrod log Remelthug - RSL) și procedee noi de deformare plastică și anume deformarea plastică intensivă (Slick Plastic Deformation - SPD).

Alte procedee de îmbunătățire a calităților electrozilor pentru sudare în puncte sunt cele de tratamente de suprafață, acoperire cu laser, acoperire în plasmă și acoperire ionică, procedee care sunt în curs de testare și care până în prezent nu au dus la rezultate semnificative în ceea ce privește fiabilitatea electrozilor.

Procedeele de elaborare a electrozilor pentru sudarea în puncte prin procedee specifice metalurgiei pulberilor sunt mai puțin tratate în literatura de specialitate și acesta a fost motivul pentru care cercetările pentru elaborarea tezei de doctorat au fost orientate în această direcție.

În finalul capitolului sunt specificate scopul și obiectivele cercetărilor prezentate la începutul rezumatului și elementele de originalitate vizate ca urmare a parcurgerii programului de cercetare.

În **capitolul al II-lea** sunt prezentate rezultatele cercetărilor privind elaborarea materialelor pentru electrozi de sudare în puncte sub formă de pulberi compozite cu matrice de cupru armată cu crom respectiv Cr+W.

Ca elemente de noutate în cercetare se identifică utilizarea unor concentrații în Cr mai mari față de concentrația standard de 1%Cr și procedeul adoptat pentru depășirea barierei de solubilitate a cromului în cupru și anume alierea mecanică.

În cercetare s-a optat pentru 4 compoziții Cu-Cr și anume 99Cu+1%Cr, 98,5Cu+1,5%Cr, 98Cu+2%Cr și 96Cu+4%Cr respectiv 3 compoziții Cu-Cr-W și anume 94Cu+1%Cr+5%W, 93,5Cu+1,5%Cr+5%W, 93Cu+2%Cr+5%W. Prin urmare conținutul în Cr a fost de 1% concentrație standard, 1,5%Cr, 2%Cr și 4%Cr.

Pentru elaborarea pulberilor compozite din amestecurile respective s-a optat în cercetare pentru alierea mecanică prin măcinare în moară de mare energie marca Fritsch, alierea mecanică fiind practic metoda neconvențională care permite obținerea de pseudoaliaje sau materiale compozite din amestecuri cu constituenți în afara echilibrului termodinamic.

Pentru alierea mecanică s-a recurs la măcinarea timp de 1 oră și 6 ore a tuturor sorturilor de amestecuri și, în plus, amestecurile Cu-Cr bogate în Cr cu 2%Cr și 4% Cr au fost măcinate până la 10 ore.

Pulberile compozite astfel elaborate au fost analizate din punctul de vedere al morfologiei lor și al capacității de a se compactiza prin presare unilaterală în matriță.

Analiza morfologică a presupus stabilirea formei granulelor de pulberi și, în acest scop s-a folosit microscopia electronică SEM și distribuția granulometrică pentru identificarea intervalelor granulometrice majoritare și a dimensiunilor medii ale granulelor de pulberi și, în acest scop s-a folosit metoda DLS (Dynamic Laser Scattering).

Pentru determinarea compactibilității pulberilor compozite acestea au fost compactizate cu presiunea de 650 MPa și s-a determinat densitatea aparentă la crud a probelor după compactizare.

Rezultatele determinărilor experimentale au scos în evidență următoarele particularități și influențe:

- Analiza microscopică arată că, în toate cazurile, după 6 ore de măcinare nu se mai identifică prezența celor două faze (Cu și Cr) și că forma granulelor de pulbere este alungită, ceea ce arată că procesele de aliere mecanică sunt în fază finală. Cu atât mai mult, după 10 ore de măcinare a pulberilor cu 2%Cr și 4% Cr constatăm că avem granule de pulbere mai fine ceea ce arată că în intervalul 6-10 ore de măcinare principalele procese sunt cele de divizare fină a particulelor de pulbere, acestea având forme aproape echiaxe;
- Analiza granulometrică scoate în evidență faptul că, pe lângă timpul de măcinare pentru alierea mecanică, creșterea conținutului în Cr contribuie în foarte mare măsură la finisarea granulației. În acest sens constatăm că pentru același timp de măcinare de 6 ore, odată cu creșterea conținutului în Cr se trece de la granulație micronică la dimensiuni submicronice. Spre exemplu pulberile compozite cu 2%Cr și 4%Cr au dimensiunile medii ale granulelor de 895 nm respectiv 785 nm după 6 ore de măcinare în timp ce pentru un conținut sub 2%Cr granulațiile după același timp de măcinare sunt micronice: 1386 nm pentru 1%Cr și 1117 nm pentru 1,5%Cr;
- În cazul pulberilor compozite din setul Cu-Cr-W constatăm că de la 1,5%Cr pulberile sunt submicronice. Pentru $\text{Cu}_{93,5}\text{Cr}_{1,5}\text{W}_5$ granulația medie este de 825 nm iar pentru $\text{Cu}_{93}\text{Cr}_2\text{W}_5$ granulația medie se situează la nivelul de 765 nm. Acest lucru se poate explica prin faptul că prezența W care este mai dur favorizează finisarea granulației la măcinare;
- Compactibilitatea pulberilor Cu-Cr scade odată cu creșterea conținutului în Cr fapt ce rezultă din analiza comparativă a densităților aparente ale comprimatelor din pulberile compozite. Acest lucru se poate explica prin faptul că acest parametru este influențat

într-o mare măsură de finețea granulației pulberilor și anume scade odată cu creșterea fineții granulației.

În **capitolul al III-lea** sunt prezentate rezultatele cercetărilor experimentale privind elaborarea electrozilor pentru sudarea prin puncte prin procedeele specifice metalurgiei pulberilor.

În acest scop pulberile compozite obținute după 6 respectiv 10 ore de laire mecanică au fost preparate pentru compactizare care s-a realizat prin presare unilaterală în matrită cu presiunea de 650 MPa. În continuare probele obținute după compactizare au fost supuse tratamentului termic de sinterizare la temperatura de 1040°C cu menținere timp de 60 de minute. Electrozii sinterizați au fost supuși tratamentului termic de îmbătrânire la temperatura de 400°C cu menținere timp de 6 ore.

Electrozii aflați în diferite stadii de elaborare după sinterizare respectiv după îmbătrânire au fost caracterizați din punctul de vedere al caracteristicilor fizice, structurale, de duritate și rezistență la uzare prin frecare și al rezistivității electrice a materialului electrozilor.

Referitor la densitatea parentă s-a constatat că densitățile aparente ale electrozilor proveniți din pulberi compozite Cu-Cr se situează în limitele (7,27-7,96) g/cm³, cele mai scăzute densități de 7,27 și 7,39 g/cm³ corespund electrozilor proveniți din pulberi aliate mecanic timp de 10 ore, care fiind foarte fine au o compactibilitate mai scăzută. În cazul electrozilor din pulberi Cu-Cr-W densitățile aparente sunt mai mari (7,99-8,15) g/cm³ și acest lucru se datorează în special prezenței wolframului.

Analiza microscopică a structurii electrozilor după tratamentul termic de îmbătrânire scoate în evidență prezența zonelor bogate în Cr sub forma precipitatelor de Cr în matricea de Cu. În cazul electrozilor proveniți din pulberi compozite cu 1%Cr și 1,5%Cr precipitatele au formă cvasihexagonală și sunt uniform distribuite, în timp ce în cazul electrozilor proveniți din pulberi compozite cu 2%Cr și 4%Cr precipitatele sunt de formă alungită și uniform distribuite. Odată cu creșterea timpului de aliere mecanică la elaborarea pulberilor compozite Cu-(2-4)%Cr crește și numărul precipitatelor de Cr iar dimensiunile lor se reduc tinzând înspre o formă punctiformă.

Tratamentele termice de îmbătrânire la care au fost supuși electrozii au avut ca principal scop durificarea lor pentru a rezista la frecările care au loc între aceștia și materialele ce urmează a fi sudate. Pentru a evalua rezistența la frecare a electrozilor s-au determinat microduritățile HV01 și au fost supuși la uzarea prin frecare uscată.

Rezultatele experimentelor au confirmat faptul că, odată cu creșterea conținutului de Cr crește duritatea aparentă a electrozilor sinterizați. Astfel adaosurile de 2%Cr și 4% asigură microdurități cu valori în intervalul (72-85) HV01 comparativ cu cele ale electrozilor cu 1%Cr și

1,5%Cr situate în intervalul (60-66) HV01. Comparativ cu electrozii comerciali elaborați prin tehnologii convenționale electrozii elaborați din pulberi compozite prin sinterizare au durități după îmbătrânire mai mici cu c.c.a 10 unități.

Referitor la comportarea la frecare uscată coeficientul de frecare este favorizat de reducerea conținutului în Cr în schimb rezistența la uzare crește odată cu creșterea conținutului în acest element.

În **capitolul al IV-lea** sunt prezentate rezultatele programului experimental vizând încercarea tehnologică a materialelor elaborate conform celor prezentate în capitolele anterioare. În cadrul acestei încercări tehnologice materialele compozite sinterizate au fost puse în operă conform condițiilor reale de exploatare (de funcționare a electrozilor pentru sudare prin presiune în puncte), urmărindu-se comportarea lor în timpul ciclurilor de încălzire și răcire sub presiune specifice unui proces de sudare real. Pentru derularea încercării propuse, au fost elaborate pastile active montabile în electrozi clasici de sudare prin presiune în puncte. Suprafața exterioară generatoare a elementului activ sinterizat a fost prelucrată similar, dar în sens complementar, prelucrării electrodului pentru sudare. Prelucrarea a fost realizată conic, astfel încât elementul activ sinterizat să se autofixeze în corpul electrodului de sudare. În brațul fix al unei mașini pentru sudare prin presiune în puncte a fost montat electrodul-probă compus conform celor de mai sus, iar în brațul superior, cel mobil, a fost montat un electrod comercial similar celui în care a fost montat elementul sinterizat.

Încercarea tehnologică a constat în aplicarea de cicluri de sudare și analiza comparativă a comportării elementului activ sinterizat și a electrodului comercial confecționat din aliaj Cu-Cr-Zr. Au fost utilizate patru regimuri distincte de sudare, după cum urmează: forța de apăsare a fost menținută constantă, timpul de curgere a curentului a fost menținut constant, însă curentul de sudare a fost modificat, valorile utilizate în experimentări ale acestuia fiind 4,8 – 6,0 – 7,2 – 8,4 kA. A fost atinsă, așadar, o plajă suficient de largă încât rezultatul să poată oferi o imagine corespunzătoare a comportării celor două materiale aflate în contact în timpul ciclului de sudare. Acest domeniu de valori este cel mai des utilizat în aplicații industriale concrete de sudare.

Evaluarea comportării materialului sinterizat (electrodul compus-sinterizat) și a celui extrudat (electrodul comercial) a constat din analiza pierderilor de masă și a modificărilor geometrico-dimensionale în urma aplicării ciclului termic de sudare. Pentru evaluarea transferului de masă (pierdere sau câștig) au fost cântăriți cei doi electrozi înainte de sudare și după sudare cu o balanță electronică de mare precizie. Diferențele de masă ale electrodului compus-sinterizat au fost comparate cu cele ale electrodului extrudat. Comparații ale diferențelor de masă au fost efectuate și între rețetele elementului activ sinterizat și între regimurile ciclurilor termice de sudare. În același timp au fost analizate din punct de vedere al geometriei și

dimensiunilor zonele care au participat la transferul de curent și care au suferit arsuri sau smulgeri / adăugări de material în urma ciclului termic de sudare.

Experimentările au fost organizate în două etape. În prima etapă au fost încercate două grupe de materiale sinterizate – o grupă Cu-(1%, 1,5% și 2%)Cr și o grupă conținând și wolfram Cu-(1,5% și 2%)Cr-5%W. La ambele grupe s-au utilizat doi timpi de aliere mecanică și anume 1 oră și 6 ore. În cea de-a doua etapă s-au utilizat grupe similare, după cum urmează: o grupă Cu-(1%, 1,5%, 2% și 4%)Cr și o grupă conținând și wolfram Cu-(1,5% și 2%)Cr-5%W.

Pentru curentul de 4,8 kA se observă o comportare relativ bună a materialului sinterizat, pierderea de masă fiind mai mică decât în cazul electrodului turnat. În medie, diferența de pierdere de masă este de aproximativ 30-40%. Deși diferențele sunt mici, este evidentă o tendință de îmbunătățire a comportării la descărcare pentru materialele sinterizate timp de 6 ore, comparativ cu cele sinterizate timp de 1 oră.

Și în cazul curentului de 6,0 kA se păstrează aceeași o comportare relativ bună a materialului sinterizat, pierderea de masă fiind și în acest caz mai mică decât în cazul electrodului turnat. În medie, diferența de pierdere de masă este de aproximativ 20-30%. Cu aceleași diferențe mici se menține și tendința de îmbunătățire a comportării la descărcare pentru materialele sinterizate timp de 6 ore, comparativ cu cele sinterizate timp de 1 oră.

Situația prezentă în cazurile anterioare (curenți mai mici de 6,0 kA) se schimbă pentru curentul de 7,2 kA, electrodul turnat prezentând o comportare la descărcare evident mai bună. În medie, diferența de pierdere de masă este de aproximativ 35-40%. Se menține însă tendința evidențiată anterior, ca materialele sinterizate timp de 6 ore să reziste mai bine la solicitarea termică și mecanică specifice descărcării electrice.

În cazul curentului de 8,4 kA tiparul comportării se menține pentru majoritatea probelor. Excepție fac probele Cu-2%Cr care au manifestat o comportare relativ bună a materialului sinterizat, comportare care este dată, probabil, de procentul masic mare de cupru. În cazul probelor cu wolfram s-a înregistrat o oarecare predispoziție la expulzare de material, predispoziție dată fie de o imperfecțiune de material, fie de diferențele mari dintre proprietățile fizice ale elementelor componente, fie de o încărcare termică mult prea mare pentru materialele implicate.

În cadrul celui de-al doilea test, au fost încercați electrozi din pulberi compozite cu 4%Cr aliate mecanic 10 ore. Rezultatele au evidențiat o comportare excelentă a compozitului Cu-Cr comparativ cu Cu-Cr-W. Mai mult, în cadrul grupului Cu-Cr, introducerea a 4% (masic) crom a avut drept efect o comportare superioară tuturor celorlalte rețete, la oricare dintre curenții de sudare reglați. Acest adaos relativ mare de crom a contribuit la mărirea rezistenței mecanice a electrodului și o scădere a fenomenelor de smulgere de material din elementul activ sinterizat.

Practic, după aplicarea ciclurilor de sudare pe suprafața elementului sinterizat nu s-a înregistrat niciun crater, deci nu s-a smuls material prin explozie. Deși conductibilitatea electrică a fost superioară în cazul conținuturilor de 1% sau 1,5% Cr, totuși, urcând la 4% Cr conductibilitatea electrică a fost însoțită și de o rezistență mecanică suficientă pentru valorile forței de apăsare utilizate.

Adaosurile de wolfram au creat și în acest caz condiții pentru smulgerea de material de pe suprafața elementului activ sinterizat. Duritatea și fragilitatea acestuia a făcut ca particule din compozitul sinterizat să fie expulzate exploziv sau transferate către electrodul extrudat.

S-a concluzionat faptul că cea mai bună comportare ca și element activ pentru un electrod de sudare prin presiune în puncte l-a avut compozitul Cu-4%Cr.

În **capitolul al V-lea** sunt prezentate concluziile finale asupra rezultatelor și contribuțiile proprii ale autoarei. Astfel, la elaborarea materialelor pentru electrozii de sudare sub formă de pulberi compozite cu matrice de Cu armată cu Cr+W s-a urmărit ca element de originalitate obținerea unor compoziții cu conținut în Cr mai mare față de concentrația standard de 1%Cr care este foarte apropiată de limita de solubilitate în stare solidă a atomilor de Cr în rețeaua Cu și anume s-au studiat comparativ cu 1,5%Cr, 2%Cr și 4%Cr.

Întrucât procedeele convenționale de obținere a aliajelor Cu-Cr nu permit obținerea de aliaje cu compoziții în Cr mai mari față de limita maximă de solubilitate în stare solidă a celor doi componenți, s-a recurs la o metodă nouă prin care se pot obține pseudoaliaje sau materiale compozite cu compoziții mai mari față de echilibrul termodinamic și anume alierea mecanică. Prin acest procedeu inserarea atomilor de solubil în solvent are loc ca urmare a unor procese de ciocnire cu mare energie în cazul proceselor de măcinare a amestecurilor de pulberi componente dozate în proporțiile urmărite în cercetare.

Rezultatele cercetărilor experimentale privind elaborarea pulberilor compozite cu matrice din Cu armate cu 1%Cr, 1,5%Cr, 2%Cr și 4%Cr respectiv cu 5%W au condus la următoarele concluzii:

- Alierea mecanică este un procedeu care permite obținerea de compozite Cu-Cr sub formă de pulberi în care elementul de armare, care este Cr depășește limita de solubilitate a Cr în Cu. Acest lucru rezultă din analiza microscopică SEM a granulelor de pulberi după 1 oră de măcinare respectiv 6 și 10 ore de măcinare. Se poate constata că după o oră de măcinare se identifică cele două componente sub formă de granule de pulberi aglomerate și odată cu creșterea timpului de măcinare cele două componente nu mai sunt vizibile, aspectul general al pulberilor fiind sub formă de particule omogene;
- Adaosul de Cr favorizează procesul de divizare fină a granulelor de pulberi în timpul proceselor de măcinare. Astfel, se poate constata că pulberile compozite cu 1%Cr și

1,5%Cr au dimensiunea medie a granulelor în domeniul micronic, 1386 μm respectiv 1117 μm după 6 ore de măcinare, pulberile compozite cu 2%Cr și 4%Cr au dimensiunile medii ale granulelor după același timp de măcinare în domeniul submicronic, 895 μm respectiv 785 μm ;

- Creșterea conținutului de Cr și a timpului de măcinare determină reducerea granulației pulberilor compozite din domeniul micronic în domeniul submicronic;
- În cazul pulberilor compozite din sistemul Cu-Cr-W, pentru conținut de 1,5%Cr și 2%Cr se produce o reducere mai mare a dimensiunilor medii ale granulelor comparativ cu aceleași pulberi din sistemul Cu-Cr și, acest lucru se datorează prezenței wolfram, care fiind mai fragil favorizează finisarea granulației în procesul de măcinare;
- Compresibilitatea pulberilor compozite evaluată prin densitatea aparentă a probelor obținute prin compactizarea lor cu presiunea de 650 MPa este influențată de conținutul lor în Cr;
- Pulberile sărace în crom, (1% și 1,5%)Cr, au densități aparente în limitele (7,65-7,75) g/cm^3 în timp ce pulberile mai bogate în Cr (2% și 4%) Cr au densități aparente în limitele (7,47-7,61) g/cm^3 . Compresibilitatea mai bună a pulberilor compozite mai sărace în Cr se datorează granulației lor de ordinul micronilor, în timp ce pulberile mai bogate în Cr fiind mai fine cu granulație submicronică sunt mai puțin susceptibile la compactizarea prin presare;
- În cazul pulberilor compozite Cu-Cr-W cu 1,5%Cr și 2%Cr care au dimensiuni submicronice, densitatea aparentă este aceeași 7,89 g/cm^3 și mult mai mare ca cea a pulberilor Cu-Cr similare. Densitatea mai mare se datorează greutatei specifice mare pe care o are wolframul prezent în proporție de 5% în aceste sorturi de pulberi.

Concluzia finală privind elaborarea pulberilor compozite din sistemele Cu-Cr și Cu-Cr-W pentru electrozii de sudare în puncte este aceea că, prin aliere mecanică se pot elabora pulberi compozite cu matrice din cupru armate cu crom în proporție mai mare de 1%, cu finețe micronică și submicronică și cu compresibilitate bună, care permite elaborarea în continuare a electrozilor prin procedee specifice metalurgiei pulberilor.

În ceea ce privește elaborarea electrozilor, pulberile compozite elaborate prin aliere mecanică au fost compactizate prin presare unilaterală în matriță cu presiunea de 650 MPa și, în continuare au fost sinterizate la 1040 °C timp de 60 de minute în mediu de argon.

Electrozii astfel obținuți au fost tratați termic la 400°C timp de 6 ore pentru îmbătrânire în vederea creșterii durității și a rezistenței la uzare prin frecare uscată.

Pentru caracterizarea electrozilor s-au determinat densitățile și microduritățile lor aparente, rezistența la uzare și rezistivitățile electrice și s-au investigat microstructurile electrozilor. Rezultatele acestor investigații au condus la următoarele concluzii:

- Densitățile aparente ale electrozilor Cu-Cr sinterizați se situează în limitele (7,27-7,96) g/cm³ și ele scad odată cu creșterea conținutului de crom deoarece cromului contribuie la divizarea fină a granulelor de pulbere la măcinarea pentru alierea mecanică și compresibilitatea scade odată cu creșterea fineții pulberilor;
- Densitățile aparente ale electrozilor Cu-Cr-W se înscriu în limitele (7,99-8,15) g/cm³ fiind mai mari față de cele ale electrozilor Cu-Cr datorită prezenței wolframului care este un element cu densitate mare;
- Analiza microscopică a structurii electrozilor după tratamentul termic de îmbătrânire scoate în evidență prezența precipitatelor bogate în crom uniform distribuite în masa matricei din cupru;
- Conținutul de crom influențează forma și dimensiunea precipitatelor bogate în crom. În cazul conținutului redus de Cr (1% și 1,5%) precipitatele au formă cvasihexagonală în timp ce la conținut ridicat de Cr (2% și 4%) precipitatele bogate în crom se reduc dimensional și au formă aproape punctiformă;
- Duritatea aparentă a electrozilor este influențată de conținutul în crom, astfel electrozii cu conținuturi mai mici în Cr (1% și 1,5%) au microdurități în limitele (60-66) HV01 iar cei cu conținut mai bogat în Cr (2% și 4%) au microdurități mai mari (72-85) HV01;
- Coeficienții de frecare ai electrozilor supuși la îmbătrânire sunt favorizați de conținutul în cupru deci sunt favorizați în cazul conținutului redus în crom;
- Rezistența la uzare prin frecare uscată a electrozilor este favorizată de creșterea conținutului în crom, astfel ariile secțiunilor uzate ale electrozilor bogați în Cr (2% și 4%) se situează la valori de (141-189) μm² în timp ce, cele corespunzătoare electrozilor mai săraci în Cr (1% și 1,5%) sunt mai mari (266-295) μm². Analog și ratele uzării se înscriu în același trend astfel, în cazul electrozilor bogați în Cr ratele uzării au valori de (2,065-2,834) mm³/N/m*10⁻⁵ iar cele ale electrozilor săraci în crom au valori de (3,923-3,989) mm³/N/m*10⁻⁵;
- Rezistivitatea electrică a electrozilor crește odată cu creșterea conținutului în crom dar creșterile sunt ne semnificative situându-se în limitele (1,9-9,7)% comparativ cu rezistivitatea electrodului cu valoarea cea mai mică;
- În cazul electrozilor cu cel mai mare conținut de crom și anume 4% rezistivitatea electrică este influențată într-o mare măsură și de timpul de aliere mecanică pentru elaborarea pulberii compozite. Astfel, electrodul realizat din pulbere compozită cu 4%

Cr aliată mecanic timp de 6 ore are rezistivitatea de $0,175 \Omega$ în timp ce electrodul din pulberea compozită aliată timp de 10 ore are rezistivitatea $0,377 \Omega$. Acest lucru se datorează densității aparente mai mică a electrodului din pulbere fină, aliată mecanic timp de 10 ore;

- În cazul electrozilor Cu-Cr-W caracteristicile electrice sunt influențate negativ de prezența wolframului. Astfel, rezistivitatea electrică a acestor electrozi are valorile cele mai ridicate și anume ($0,342-0,372$) Ω .
- Valorile efective ale masei transferate în timpul încercării tehnologice sunt relativ mici, cea mai mare valoare înregistrată fiind cea de 122 mg.
- Încercând o ierarhizare din acest punct de vedere, devine clară superioritatea electrozilor confecționați din compozitul Cu-4%Cr, aliat mecanic 6 ore, a cărui comportare la ciclurile de sudare a fost excelentă, în sensul că pierderea de masă a fost insesizabilă la nivel de miligrame pentru fiecare dintre cei patru curenți de sudare.
- Electrozii confecționați din compozitele conținând wolfram au prezentat o comportare mai slabă la încercarea tehnologică, suprafața de contact suferind atât exfolieri cât și expulzări explozive de material.

Raportat la datele din literatura de specialitate privind materialele și tehnologiile de elaborare a electrozilor pentru sudarea în puncte, cercetările desfășurate pentru elaborarea tezei de doctorat au următoarele elemente de originalitate:

- Elaborarea unor materiale compozite cu matrice din cupru armate cu crom și wolfram cu conținut de crom mai mare față de concentrația standard de 1%;
- Elaborarea prin aliere mecanică a materialelor compozite armate cu până la 4% Cr sub formă de pulberi micronice și submicronice;
- Elaborarea electrozilor din pulberi compozite prin procedee specifice metalurgiei pulberilor;
- Elaborarea electrozilor pentru sudare prin puncte cu rezistențe mari la uzarea prin frecare datorită conținutului mare în crom;
- Elaborarea soluției constructive pentru un electrod compus destinat încercării tehnologice, proiectarea și realizarea acestuia
- Conceperea și organizarea standului de încercare tehnologică, având trei puncte de verificare: determinarea temperaturii materialului sinterizat în timpul procesului de sudare, determinarea pierderilor de masă și determinarea caracteristicilor geomtrico-dimensionale ale amprentei rezultate în urma aplicării ciclului termic de sudare
- Încercarea tehnologică a materialului compozit sinterizat, în condiții reale de sudare electrică prin presiune în puncte

- Elaborarea de modele matematice ale evoluției pierderii de masă a materialului sinterizat, utilizat ca element activ în componența electrozilor pentru sudare electrică prin presiune în puncte; modelul matematic este construit în funcție de curentul de sudare și are formă parabolică
- Elaborarea unui model matematic care permite modelarea cu o eroare de sub 1% a valorilor pierderilor de masă din corpul materialului sinterizat, utilizat ca element activ în componența electrozilor pentru sudare electrică prin presiune în puncte

Datele rezultate din cercetările experimentale au scos în evidență faptul că, prin creșterea conținutului în Cr a amestecurilor de pulberi cu elementul de bază cupru are loc finisarea intensivă a pulberilor la măcinare pentru alierea mecanică, fapt ce aduce dificultăți la compactizarea lor pentru elaborarea electrozilor. În acest cadru pentru îmbunătățirea densității aparente și implicit a caracteristicilor funcționale ale electrozilor, cercetările pot fi axate în continuare pe următoarele direcții:

- Represarea la rece și/sau la cald a electrozilor după operația de sinterizare;
- Testarea unor lianți pentru presarea la cald (worm compaction);
- Sinterizarea pulberilor compozite în plasmă prin procedeul SPS (Spark Plasma Sintering);

De asemenea cercetările pot fi continuate în direcția utilizării de pulberi de crom și wolfram cu dimensiuni inițiale submicronice pentru reducerea timpului de măcinare în procesele de aliere mecanică.