

DEZVOLTAREA MICROÎMBINĂRILOR PENTRU FABRICAREA DISPOZITIVELOR ELECTROMECHANICE MEMS

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul INGINERIE INDUSTRIALĂ
de către

Ing. Grigore Sebeș

Conducător științific:	prof.univ.dr.ing. Dorin Dehelean
Referenți științifici:	prof.univ.dr.ing. Mihail Mangra
	prof.univ.dr.ing. Radu Iovănaș
	prof.univ.dr.ing. Tudor Iclănzan

Ziua susținerii tezei: 12.06.2012

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|---|--|
| 1. Automatică | 8. Inginerie Industrială |
| 2. Chimie | 9. Inginerie Mecanică |
| 3. Energetică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 4. Ingineria Chimică | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 5. Inginerie Civilă | 12. Ingineria sistemelor |
| 6. Inginerie Electrică | 13. Inginerie energetică |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 14. Calculatoare și tehnologia informației |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2012

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul catedrei de Inginerie a Departamentului de Inginerie și Management al Sistemelor Tehnologice Drobeta Turnu Severin din cadrul Universității din Craiova și în laboratoarele de cercetare din cadrul INCD în Sudură și Încercări Materiale ISIM Timișoara.

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat prof.dr.ing. Dorin Dehelean pentru valoroasa îndrumare pe parcursul cercetărilor documentare și experimentale derulate, respectiv pentru facilitarea accesului în laboratoare cu un înalt grad tehnologic din cadrul INCD în Sudură și Încercări Materiale ISIM Timișoara, fiind onorat, că am avut ca îndrumător de doctorat pe Președintele Asociației Europene de Sudură. De asemenea, mulțumiri deosebite sunt adresate domnului prof. dr. ing. Mihail Mangra, prorector cu probleme de cercetare în cadrul Universității din Craiova și domnului prof.dr.ing. Ion Ciupitu șeful Departamentului de Inginerie și Management al Sistemelor Tehnologice Drobeta Turnu Severin pentru sprijinul acordat și facilitarea deplasărilor pentru cercetare la ISIM Timișoara și susținerii a unor lucrări științifice la conferințe naționale și internaționale. Țin să mulțumesc foarte mult, prietenului meu, conf.dr.ing. Ionel Dănuț Savu, profesor în cadrul Departamentului de Inginerie și Management al Sistemelor Tehnologice Drobeta Turnu Severin–Universitatea din Craiova pentru ajutorul substanțial acordat în timpul cercetărilor experimentale, și în timpul elaborării tezei de doctorat.

Mulțumiri deosebite, se cuvin colectivului laboratorului de sudare cu ultrasunete, în special domnului ing. Octavian Oancă și domnului dr.ing. Alin Sirbu și colectivului laboratorului de prelucrare și sudare cu fascicul Laser- fizician Valentin Bârdeanu și ing. Cristian Ciucă pentru implicarea lor la realizarea programului de cercetare experimentală. Mulțumesc colegilor mei din universitate, în special domnului dr.ing. Claudiu Nicolicescu pentru sprijinul acordat la verificarea și testarea microîmbinărilor realizate.

Mulțumesc soției mele Florentina, și fiului meu Răzvan, pentru faptul ca m-au sprijinit și m-au înțeles în acești ani de activitate doctorală. Teza de doctorat o dedic părinților mei dragi, Ion și Aleksandra Sebeș, pentru faptul ca mi-au dat viață, m-au crescut, m-au învățat și îndrumat în spiritul creștin.

Timișoara, martie 2012

Grigore Sebeș

Părinților mei

Sebeș, Grigore

Dezvoltarea microîmbinărilor pentru fabricarea dispozitivelor electromecanice MEMS

Teze de doctorat ale UPT, Seria 8, Nr. 42, Editura Politehnica, 2012, 192 pagini, 189 figuri, 37 tabele.

ISSN: 1842-8967

ISBN: 978-606-554-464-2

Cuvinte cheie: microîmbinare, MEMS, eutectic, ultrasunete, termosonic

Rezumat,

Teza de doctorat își propune o cercetare detaliată a experimentărilor celor trei tipuri de microîmbinare: eutectică, cu fascicul Laser și termosonică, de evidențiere a principalelor influențe ale parametrilor tehnologici pentru microîmbinările tip: folie-folie, fir- folie din materiale metalice omogene și eterogene, fir-fir pentru materiale metalice omogene și folie-folie pentru materiale polimerice.

De asemenea, teza își propune conceperea, realizarea și verificarea în funcționare a unui dispozitiv de microîmbinare termosonică hibridă Laser-Ultrasunete, în care componentele MEMS pentru îmbinare sunt preîncălzite cu fascicul Laser după care urmează operația de îmbinare cu ultrasunete.

Un obiectiv important al tezei de doctorat este de concepere, realizare și verificare în funcționare a unui dispozitiv utilizat pentru microîmbinarea foliilor din polimeri cu fascicul de la o diodă Laser în scopul de a îmbina părți componente nemetalice ale MEMS sub temperatura de 240°C.

O propunere importantă pentru teză, este de a concepe, realiza și a verifica un cap activ modular de microîmbinare termosonică hibridă cu Laser și ultrasunete.

CUPRINS

	Introducere	8
Cap.1	Dispozitive electromecanice MEMS	12
	1.1 Generalități.....	12
	1.2 Structura microsistemului tehnologic MST.....	12
	1.3 Fabricarea microdispozitivelor MEMS.....	13
	1.4 Materiale necesare pentru fabricarea microdispozitivelor MEMS.....	17
	1.5 Aplicații ale microdispozitivelor electromecanice MEMS.....	18
Cap.2	Microîmbinări și procese de microîmbinare	22
	2.1 Microîmbinări. Aspecte generale.....	22
	2.2 Microîmbinări specifice microdispozitivelor MEMS.....	23
	2.2.1 Microîmbinări pentru contacte electrice.....	24
	2.2.2 Microîmbinări pentru încapsulare.....	25
	2.2.3 Microîmbinări între suportul MEMS și placa de bază.....	27
	2.3 Microîmbinarea componentelor MEMS.....	27
Cap.3	Microîmbinare prin lipire eutectică	30
	3.1 Microîmbinarea eutectică.....	30
	3.2 Tipuri de microîmbinări eutectice.....	31
	3.2.1 Microîmbinări eutectice cap la cap.....	31
	3.2.2 Microîmbinări eutectice prin suprapunere.....	32
	3.2.3 Microîmbinări eutectice în colț.....	33
	3.3 Tehnologia microîmbinării eutectice.....	34
	3.3.1 Surse termice și moduri de încălzire utilizabile la microîmbinarea eutectică.....	34
	3.3.1.1 Încălzirea directă cu sursă termică rezistivă.....	34
	3.3.1.2 Încălzirea cu jet de aer cald.....	34
	3.3.1.3 Profilarea curbei de încălzire prin impulsuri de caldura.....	35
	3.3.1.4 Încălzirea cu radiații infraroșii.....	35
	3.3.2 Pregătirea componentelor de bază înaintea procesului de microîmbinare eutectică.....	36
	3.3.3 Parametrii tehnologici și influența lor asupra caracteristicilor microîmbinărilor eutectice.....	37
	3.4 Aliaje de îmbinare pentru procesele de îmbinare și microîmbinare eutectică.....	39
	3.4.1 Caracteristici generale necesare pentru aliajele de adaos eutectice.....	39
	3.4.1.1 Condiții de acceptare a potențialelor aliaje pentru microîmbinare eutectică.....	39
	3.4.1.2 Elemente alternative plumbului pentru realizarea de aliaje de microîmbinare.....	40
	3.4.2 Sisteme eutectice metalice utilizabile în procesele de microîmbinare eutectică.....	40
	3.4.2.1 Eutecticul Au-Si.....	40
	3.4.2.2 Sistemul de aliaje Au-Sb.....	41
	3.4.2.3 Sistemul de aliaje Au-In.....	41
	3.4.2.4 Sistemul de aliaje Au-Bi.....	41
	3.4.2.5 Sistemul de aliaje Ag-Sn.....	41
	3.4.2.6 Sistemul de aliaje Sn-Ag-Cu (SAC).....	41
	3.4.2.7 Sistemul de aliaje Sn-Cu.....	42

Cap.4	Microîmbinare prin topire cu fascicul Laser.....	44
	4.1 Fasciculul Laser – sursa termica pentru procese de îmbinare și microîmbinare.....	44
	4.1.1 Monocromaticitatea.....	46
	4.1.2 Coerența.....	46
	4.1.3 Direcționalitatea.....	47
	4.1.4 Puterea, energia și focalizarea fasciculului Laser.....	47
	4.1.5 Strălucirea.....	47
	4.1.6 Polarizarea.....	47
	4.2 Clasificare Laseri.....	48
	4.2.1 Laseri solizi.....	48
	4.2.2 Laseri cu semiconductori.....	48
	4.2.3 Laseri cu gaz.....	49
	4.3 Microîmbinarea prin topire cu fascicul Laser.....	49
	4.3.1 Procesul de microîmbinare cu fascicul Laser.....	51
	4.3.1.1 Microîmbinarea polimerilor cu fascicul Laser.....	51
	4.3.1.2 Microîmbinarea cu mască a polimerilor.....	52
Cap.5	Microîmbinare termosonică.....	53
	5.1 Procesul de microîmbinare termosonică- Generalități.....	53
	5.2 Variante de microîmbinări termosonice.....	56
	5.2.1 Microîmbinarea termosonică "ball-bonding" a firelor metalice.....	56
	5.2.2 Microîmbinarea termosonică "wedge-bonding" a firelor metalice.....	57
	5.2.3 Microîmbinarea termosonică a benzilor din materiale neferoase.....	58
	5.2.4 Microîmbinarea termosonică de tip "Flip Chip".....	60
	5.2.5 Microîmbinarea termosonică a conexiunilor electrice din aur prin tehnicile "ball bonding"- "wedge bonding".....	61
	5.3 Obiectivele tezei de doctorat.....	64
Cap.6	Cercetări asupra procesului de microîmbinare eutectică.....	66
	6.1 Programul experimental.....	66
	6.2 Tehnologia de microîmbinare eutectică.....	66
	6.3 Caracterizarea microîmbinărilor eutectice.....	67
	6.3.1 Caracterizare geometrico-dimensională.....	68
	6.3.2 Caracterizare morfo-structurală.....	71
	6.3.2.1 Încercarea la tracțiune a microîmbinărilor eutectice.....	71
	6.3.2.2 Încercări de microdurate HV 0,01.....	76
	6.3.3 Caracterizarea funcțională (rezistența electrică de contact).....	80
	6.4 Imperfecțiuni de material specifice microîmbinării eutectice.....	85
	6.5 Concluzii generale.....	86
Cap.7	Cercetări asupra procesului de microîmbinare prin topire cu fascicul Laser.....	88
	7.1 Cercetări experimentale ale procesului de microîmbinare prin topire cu fascicul Laser a materialelor metalice.....	88
	7.1.1 Microîmbinarea prin topire cu fascicul Laser a foliilor din aluminiu.....	89
	7.1.2 Microîmbinarea prin topire cu fascicul Laser a foliilor din cupru.....	95
	7.1.3 Microîmbinarea prin topire cu fascicul Laser a firelor din cupru.....	98
	7.2 Cercetări experimentale ale procesului de microîmbinare prin topire cu fascicul Laser a materialelor polimerice.....	103
	7.2.1 Conceperea unui cap de microîmbinare cu Laser- diodă.....	103
	7.2.2 Experimentări cu capul de microîmbinare Laser- diodă.....	104
Cap.8	Cercetări asupra procesului de microîmbinare termosonică.....	111

8.1	Procesul de microîmbinare termosonică a metalelor neferoase specifice confecționării microdispozitivelor MEMS.....	111
8.1.1	Caracterizarea morfo-structurală a microîmbinărilor.....	112
8.1.2	Determinarea caracteristicilor mecanice ale probelor.....	116
8.1.3	Determinări ale rezistențelor electrice la microîmbinările termosonice....	117
8.2	Cercetarea comparativă a proceselor de microîmbinare cu ultrasunete și microîmbinare termosonică aplicate în cazul îmbinărilor fir- folie(substrat).....	120
8.2.1	Microîmbinarea cu ultrasunete a conductorilor monofilari din cupru, aur și argint pe substrat de cupru.....	120
8.2.1.1	Modelarea matematică a influențelor parametrilor acționării cu ultrasunete asupra temperaturii obținute în cadrul procesului.....	124
8.2.2	Microîmbinarea termosonică a metalelor neferoase utilizând drept sursă termică suplimentară - fasciculul Laser.....	126
8.2.2.1	Simularea câmpului termic la microîmbinări prin suprapunere a cuplurilor de materiale metalice: cupru- cupru, argint- cupru și aur- cupru.....	135
8.2.2.2	Simularea procesului de microîmbinare termosonică a două folii din cupru îmbinate în puncte prin suprapunere.....	137
8.2.2.3	Caracterizarea morfo - structurală și mecanică a microîmbinărilor.....	149
Cap.9	Conceperea unui cap activ de microîmbinare hibridă Ultrasunete- Laser..	157
9.1	Analiza condițiilor de funcționare a capului activ.....	157
9.2	Conceperea soluției constructive pentru capul hibrid de microîmbinare Ultrasunete-Laser.....	158
9.3	Verificarea capului activ modular pentru microîmbinare termosonică.....	160
9.4	Examinarea microscopică.....	167
9.5	Încercări de microduritateVickers HV- 0,02.....	169
9.6	Concluzii.....	172
Cap.10	Concluzii, contribuții personale și direcții de cercetare pentru viitor	173
10.1	Concluzii.....	173
10.1.1	Concluzii privind cercetarea documentară.....	173
10.1.2	Concluzii privind cercetare experimentală.....	174
10.2	Contribuții personale.....	175
10.2.1	Contribuții în domeniul dezvoltării teoretice.....	175
10.2.2	Contribuții ale cercetării experimentale.....	176
10.3	Direcții de cercetare pentru viitor.....	177
	Anexa 1	178
	Bibliografie	180

Introducere

Industria micro senzorilor și a actuatorilor cunoaște o dezvoltare accelerată începând cu ultimii 10 ani, toate domeniile de activitate utilizând din ce în ce mai mult astfel de micro dispozitive, devenite pe măsura introducerii noilor tehnologii adevărate sisteme indispensabile. Domeniul sistemelor microelectromecanice, sisteme cunoscute sub acronimul MEMS, a fost identificat ca fiind unul dintre cele mai promițătoare provocări pentru secolul al 21-lea având potențialul de a revoluționa atât produse industriale, cât și produse de larg consum prin combinarea microelectronicii pe bază de siliciu cu o tehnologie de microprelucrare. Dacă microprelucrarea semiconductorilor a fost considerată a fi prima revoluție în microfabricație, industria microdispozitivelor MEMS este a doua revoluție[110].

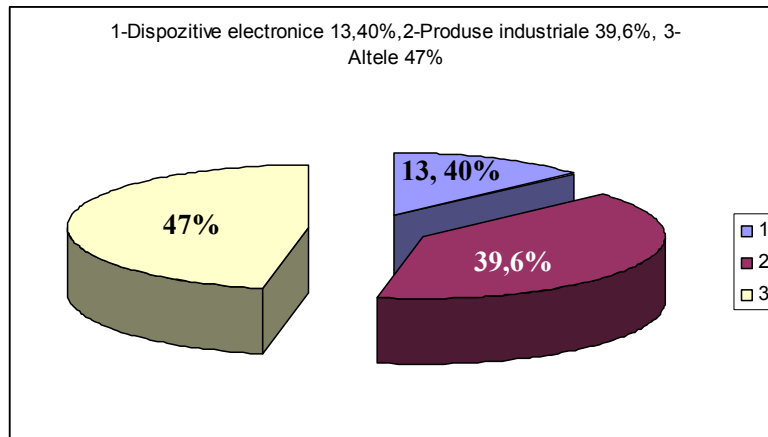
Electronica combinată cu tehnologia senzorilor constituie sistemul fundamental de operare pentru aproape toate produsele moderne și industriale de la telefonie mobilă la combine audio. Integrarea electronicii în alte produse crește tot mai mult, de exemplu: la automobile, aerospațiale, asamblarea de echipamente prin microîmbinare, nu va putea fi operată fără asistență electronică IT/senzorială[101]. Sectorul electronic este, de asemenea, un factor important ce influențează foarte mult mediul înconjurător. Pe de-o parte, poate economisi energia printr-o administrare inteligentă (ex. supravegherea motoarelor, utilizarea energiei produselor de consum) și o supraveghere a energiei regenerabile (ex. energia solară, eoliană și hidroenergia). Electronica - este un sector care contribuie la creșterea deșeurilor (ex. produsele de consum - telefoane mobile, televizoare, etc.). Dezvoltările viitoare în ceea ce privește materialele și procesele de microasamblare, vor influența echilibrul general al efectului asupra mediului.

Sectorul produselor electronice includ dispozitive electronice, ce sunt încorporate în alte componente, precum dispozitive utilizate în medicină, aeronautică, industria automobilelor și în domeniul apărării. Piața este divizată în producții pentru bunurile de consum, comunicații, computere, sectorul industrial și cel al automobilelor. Piața globală a produselor electronice a însumat în 2006 1,8 trilioane \$ și se așteaptă ca aceasta piață să crească cu o creștere anuală de 9,5 % pe următorii 5 ani

Produsele industriale au ca procent din vânzările din cadrul pieței circa 39,6 %, în timp ce dispozitivele electronice de larg consum sunt în proporție de 13,4%.

Rapoartele din industrie, împart piața produselor de larg consum în patru categorii: a) computere, b) comunicații personale, c) dispozitive home media și dispozitive de lux. Într-un raport din 2005 publicat de In-Stat primele trei dispozitive în ceea ce privește creșterea erau: playere audio digitale portabile (57%), televizoare LCD (52,3%), și DVD recordere (51,4 %).

Progresele rapide în ceea ce privesc computerele și sistemele electronice asociate pot fi susținute numai de metode de îmbinare adaptate la o scară miniaturală de operare. Există 6 procedee de bază pentru îmbinare la asamblarea de produse electronice: fabricare împachetare microdispozitiv, atașarea și interconectarea de componente active și pasive la circuitul de substrat, sigilarea pachetelor, atașarea pachetelor cu dispozitive la placa cu circuite, și montarea de dispozitive electronice printr-o încapsulare fabricată. Tehnicile de îmbinare folosite cel mai des sunt prezentate în tabelul de mai jos.



ACTIVITATE	PROCESUL DE ÎMBINARE
Fabricarea pachetului din metal/ceramică	Îmbinarea prin lipire și brazare, îmbinare de rezistență, îmbinare cu Laser, îmbinare cu fascicul de electroni,
Atașarea de componente la substrat	Îmbinare prin lipire, Îmbinare cu adezivi
Interconexiuni la circuite în stare solidă	Îmbinare termosonică/ultrasonică cu presiune cu încălzire locală Îmbinare prin lipire
Sigilarea pachetului	Încapsulare cu plastic, fuziunea sticlei Îmbinare prin brazare, îmbinare cu Laser Îmbinare prin presiune la rece, lipire, îmbinare cu adezivi
Atașarea dispozitivelor încapsulate pe placa de circuite	Lipire, îmbinare cu adezivi Îmbinare prin rezistență
Fabricarea încapsulării	Fixări mecanice, îmbinare cu adezivi, îmbinare cu metale și polimeri

Beneficiile îmbinării sunt:

- impactul termic scăzut
- îmbinări rezistente la temperaturi înalte și viteze de îmbinare ridicată
- profilul/amprenta îmbinării este redusă
- consumul de energie este relativ mai mic și îmbinările au o rezistență la electricitate mai redusă
- înlocuirea lipiturilor bazate pe aliaje din plumb cu aliaje noi ecologice

În plus, iată câteva tendințe, care influențează îmbinarea materialelor în cadrul pieței electronice:

- Se așteaptă ca piața obiectelor electronice de unică folosință să crească până la 26, 2 miliarde \$ până în 2015.
- De asemenea în 2015, se așteaptă ca RFID tags să înlocuiască parțial codurile de bare și să genereze 12,4 miliarde \$ în profituri.

Ca direcții principale de urmărit și de atins în industria electronică se amintesc:

- *materiale care să nu dăuneze mediului:* O tendință mare este de folosire a materialelor și aliajelor de îmbinare produse fără plumb. Restricția Uniunii Europene Împotriva Materialelor Periculoase Mediului (RoHS) a intrat în acțiune pe 1 iulie 2006 iar acum industria electronică încearcă să adopte

materiale și aliaje de îmbinare ecologice fără plumb, care să nu dăuneze mediului.

- *miniaturizarea și supravegherea costurilor*: Tendința de miniaturizare și externalizarea resurselor sunt importante pentru piața produselor electronice. Nevoia de portabilitate a stârnit tendințele de miniaturizare, în timp ce chestiunile privind controlul costurilor sunt similare celor de pe piața dispozitivelor medicale.
- *energie portabilă*: Creșterea este stârnită de dispozitivele wireless. Utilizările primare includ produsele de consum, industriale și profesionale, dispozitivele pentru comunicare personală, computere portabile și dispozitive electronice și portabile militare. Bateriile reîncărcabile și motoarele de mici dimensiuni vor avea parte de câștiguri printre tehnologiile deja renumite. Celulele solare sunt protejate pentru a rămâne nișe, în timp ce celule miniaturale și micro devin un factor major în cadrul acestei piețe până în 2013. Energia electrică portabilă este privită ca una din cele mai timpurii aplicații.

Procesele de microîmbinare joacă un rol decisiv în calitatea și eficiența dispozitivelor electronice. Dezvoltarea proceselor de microîmbinare pentru componente ale microdispozitivelor MEMS apare ca o strictă necesitate, această preocupare cunoscând în prezent o amploare remarcabilă în țările cu o industrializare ridicată.

Tema de doctorat se înscrie în această prioritate, propunându-și să realizeze următoarele obiective principale:

- cercetarea procesului de microîmbinare eutectică și evidențierea principalelor influențe ale parametrilor tehnologici ai procesului pentru cazul îmbinărilor tip folie - folie din materiale omogene (cupru) și eterogene (argint-cupru) folosind diferite tipuri de aliaje eutectice ecologice fără plumb.
- cercetarea procesului de microîmbinare prin topire cu fascicul Laser și evidențierea principalelor influențe ale parametrilor tehnologici ai procesului pentru cazul îmbinărilor tip folie-folie din materiale metalice omogene (aluminiu sau cupru) și a îmbinărilor tip fir-fir din materiale omogene (cupru), respectiv al îmbinării materialelor polimerice sub formă de folie.
- cercetarea procesului de microîmbinare termosonică și evidențierea principalelor influențe ale parametrilor tehnologici ai procesului de realizare a îmbinărilor tip folie-folie din materiale omogene (aluminiu sau cupru) și eterogene (aluminiu-cupru), folosind ca sursă termică suplimentară un jet cu aer cald, respectiv un fascicul Laser tip diodă
- cercetarea posibilității de microîmbinare hibridă prin ultrasunete și fascicul Laser a îmbinărilor tip fir-folie omogene (cupru-cupru) și eterogene (aur-cupru, argint-cupru).

În vederea realizării obiectivelor principale ale tezei a fost necesară definirea unor obiective secundare și anume:

- conceperea, realizarea și verificarea în funcționare a unui dispozitiv de microîmbinare ce utilizează fasciculul Laser produs de o diodă Laser
- conceperea, realizarea și verificarea în funcționare a unui dispozitiv pentru microîmbinarea cu Laser a foliilor din polimeri
- conceperea, realizarea și verificarea unui cap activ modular de microîmbinare termo sonică hibridă cu ultrasunete și Laser.

Majoritatea experimentărilor pentru teza de doctorat s-au derulat în cadrul Proiectului Național de Cercetare din programul Parteneriate PNCDI 71- 135/2007 (2007- 2010), MICROWELD, doctorandul făcând parte din colectivul de cercetare. Experimentele s-au executat în laboratoarele de cercetare de la ISIM Timișoara

(microîmbinare cu fascicul Laser Nd. YAG, microîmbinare cu ultrasunete, microîmbinare termosonică), Universitatea din Craiova (microscopie nanoscopie,) ICPE-CA Bucuresti (analiza RDX), INFLPR Bucuresti (spectroscopie), SC TARD SRL Drobeta - Turnu Severin (microscopie). Teza de doctorat este structurată în două părți: Partea 1, capitolele 1- 5 (45 pagini), cuprinde un studiu documentar din literatura de specialitate actuală privind aplicabilitatea microdispozitivelor electromecanice MEMS. În capitolul 1 sunt prezentate elemente generale privind microdispozitivele electromecanice MEMS, rolul și aplicabilitatea lor în diferite domenii.

În capitolul 2 sunt analizate elementele specifice proceselor de microîmbinare iar în capitolele 3, 4 și 5 sunt sintetizate cunoștințele actuale privind procesele de microîmbinare eutectică, prin topire cu fascicul Laser și termosonică. Partea 2 a tezei cuprinde capitolele 6 - 9 (106 pagini) și prezintă cercetarea teroretică și experimentală efectuată de doctorand. Capitolele 6, 7 și 8 conțin rezultatele cercetării efectuate de doctorand asupra procesului de microîmbinare eutectică, prin topire cu fascicul Laser, respectiv microîmbinare termosonică. În capitolul 8 sunt prezentate, de asemenea, rezultatele cercetărilor experimentale asupra unui nou procedeu de microîmbinare hibridă realizată prin combinarea îmbinării cu ultrasunete cu îmbinarea cu Laser. Acest capitol conține și o modelare/simulare a procesului de microîmbinare termosonică cu programe de analiză cu element finit ANSYS. Capitolul 9 cuprinde conceperea, realizarea și verificarea unui cap activ modular de microîmbinare hibridă Ultrasunete-Laser diodă. Lucrarea se încheie cu capitolul 10 care sintetizează concluziile tezei, contribuțiile personale ale doctorandului și direcțiile pentru cercetările viitoare în domeniul tematic al tezei. Bibliografia cuprinde peste 110 titluri, majoritatea citărilor fiind lucrări din ultimii 5 ani din fluxul principal de informație. În bibliografie sunt incluse și 11 lucrări ale doctorandului publicate sau comunicate în domeniul tematic al tezei.

* * *

Doctorandul, dorește să mulțumească, în primul rând, conducătorului științific al lucrării, domnului Prof. Dr. Ing. Dorin Dehelean, care i-a îndrumat activitatea de cercetare cu înalt profesionalism și competență în materie.

Doctorandul transmite, multe mulțumiri, și mult respect Prof. Dr. Ing. Mihail Mangra, prorector al Universitatii Craiova. Multe mulțumiri domnului Prof.Dr.Ing. Ion Ciupitu pentru facilitarea deplasărilor în scopul cercetării la Timișoara și susținerii unor lucrări științifice la conferințe naționale și internaționale. De asemenea, doctorandul dorește să mulțumească domnului conferențiar dr.ing.Dănuț Savu de la Departamentul de inginerie mecanică al Universitatii din Craiova pentru ajutorul substanțial acordat la perfecționarea profesională în domeniul microtehnicii în desfășurarea procesului de cercetare. Doctorandul, mulțumește colectivului ISIM Timisoara din laboratorul de sudare cu ultrasunete, dr.ing.Alin Sirbu, ing Octavian Oancă, precum și din laboratorul de prelucrare cu Laser, fiz. Valentin Bîrdeanu și ing. Cristian Ciucă care l-au ajutat la realizarea programului de cercetare experimentală. Doctorandul mulțumeste colegilor săi din Universitatea din Craiova, în special, Dr. Ing.Claudiu Nicolicescu pentru sprijinul acordat —la testarea îmbinărilor realizate. În final, doctorandul mulțumeste soției Florentina și fiului Răzvan pentru faptul ca l-au sprijinit și înțeles în acești ani de activitate doctorală.

Dedic această lucrare de cercetare dragilor mei părinți pentru faptul ca mi-au dat viață, m-au crescut, m-au învățat și îndrumat în spiritul creștin

Autorul

1. Micro dispozitive electro mecanice MEMS

1.1 Generalități

Dispozitivele micro-electro-mecanice (MEMS)[99], sunt așa cum arată și numele lor, rodul cercetării interdisciplinare la granița a trei domenii diferite: mecanică fină, electronică și fizica semiconductorilor. Aceste microdispozitive conțin mecanisme având dimensiuni de ordinul micronilor, capabile de mișcări foarte precise și care sunt acționate de forțe și momente de natură gravitațională, elastică, magnetică și/sau electrică. În figura 1.1 sunt prezentate două microdispozitive MEMS având dimensiunile comparabile cu cele ale unui fir de păr uman, respectiv ale piciorușelor unui păianjen[107].

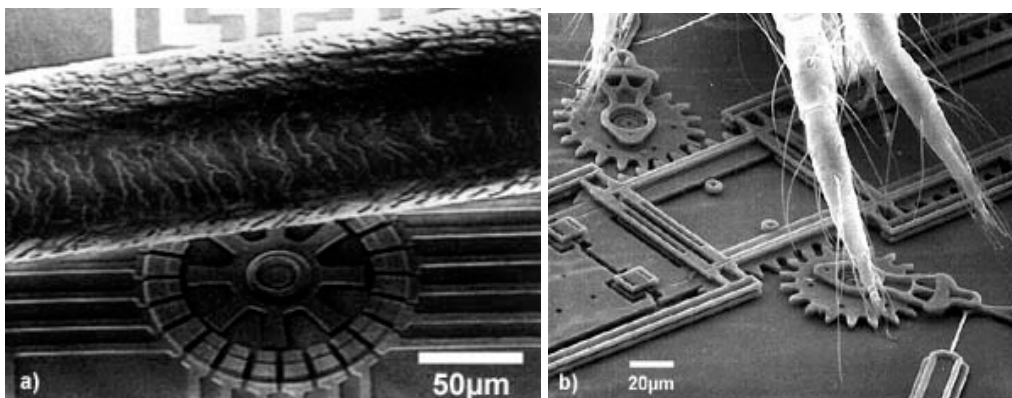


Figura 1.1 Microdispozitiv MEMS comparabil cu un fir de păr uman (a), configurația unui microdispozitiv MEMS comparat cu piciorușele unui păianjen(b)

Microdispozitivele MEMS sunt deja utilizate pe scară largă în multe domenii tehnice, și vor deveni din ce în ce mai întâlnite. Dintre principalele clase de aplicații se amintesc senzori și microsenzori [42],[47],[92],[67], actuatori, accelerometre [103], micromotoare, circuite electronice, ș.a. În funcție de destinația pe care o au microdispozitivele electromecanice MEMS, acestea pot avea în componența lor senzori, traductoare și/sau actuatoare.

1.2 Structura unui microsistem tehnologic

Un microsistem tehnologic (MST) este compus din structuri mecanice, electronice și optice integrate pe același cip de siliciu. În funcție de combinația domeniilor electronică, mecanică și optică se definesc diferite tipuri de sisteme: microsisteme electromecanice MEMS – electronică și mecanică, microsisteme optomecanice – optică și mecanică, microsisteme fotonice și optoelectronice – electronică și optică, microsisteme optoelectromecanice – electronică, mecanică și optică, figura 1.2,[100].

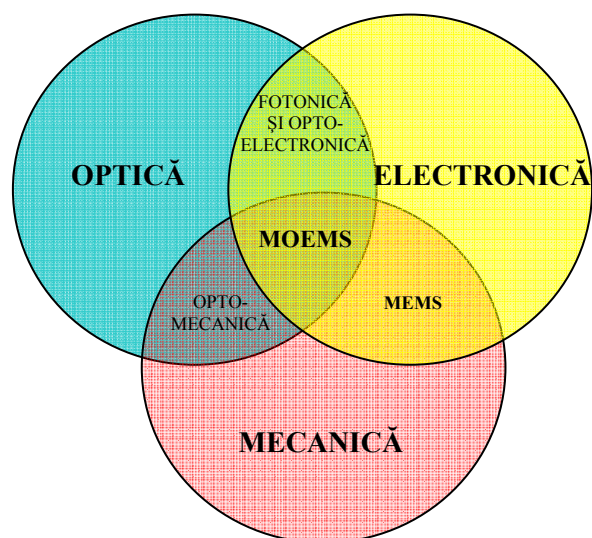


Figura 1.2 Tipuri de microsisteme (MST)

1.3 Fabricarea microdispozitivelor MEMS

MEMS-urile sunt microdispozitive obținute prin integrarea de elemente mecanice, de senzori, actuatori și componente electronice pe un substrat comun (de regulă o plăcuță de siliciu), prin tehnologii de microfabricație specifice.

Componentele electronice se realizează prin tehnologiile specifice circuitelor integrate în timp ce componentele micromecanice se realizează prin tehnologii de microfabricație constând din succesiuni de operații de corodare, adăugare de straturi, înlăturare de straturi de sacrificiu etc. În general, la fabricarea microdispozitivelor electromecanice MEMS se utilizează o serie de tehnologii:

- microprelucrarea la suprafață („surface micromachining”),
- microprelucrarea în volum („bulk micromachining”),
- microprelucrarea cu un grad înalt de tehnologii, cum ar fi LIGA*
- electrodepunere
- fotolitogravura [32]
- prelucrare prin descărcări electrice.

Microprelucrarea la suprafață (surface micromachining SM) [107] implică o tehnică de microprelucrare a combinațiilor de pelicule subțiri unde stratul de sacrificiu poate fi corodat, dar fără o corodare semnificativă sau un atac chimic asupra microstructurii dielectricului sau a substratului. În figura 1.3 sunt prezentate secvențele procesului de microprelucrare a suprafeței:

- A - depunerile stratului de spațiere (stratul dielectric subțire de izolare nu este arătat).
- B - strat de bază căruia i s-a aplicat masca 1
- C - depunerea stratului microstructurii.
- D - stratul de bază la care i se aplică masca nr.2
- E - corodarea selectivă a stratului de spațiere

*(Lithographie, Galvanoformung, Abformung)

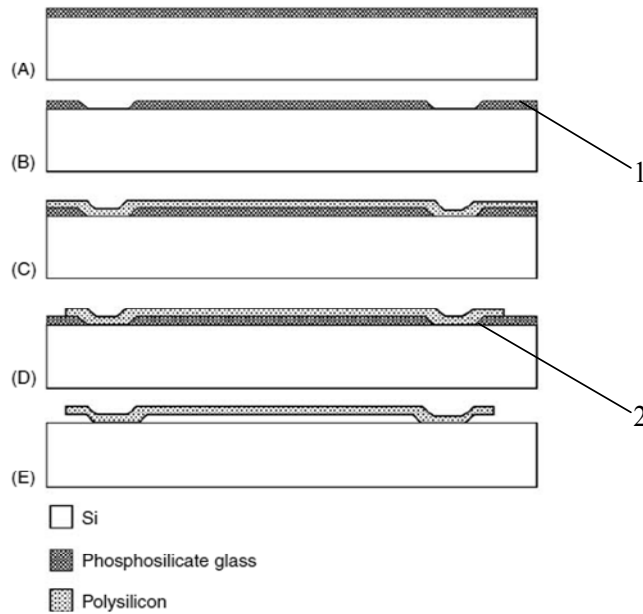


Figura 1.3 Secvențe ale procesului de microprelucrare a suprafeței [69]

Microprelucrarea cu grad înalt de tehnologii (high-aspect-ratio micromachining HARM) este o tehnologie de fabricare a microdispozitivelor MEMS ce implică microprelucrarea ca un prim pas, pentru obținerea unei cavități cu o anumită configurație, urmată de formarea microstructurii prin injectarea de material în cavitatea din PMMA (polymethylmethacrylat). În figura 1.4 sunt prezentate etapele de realizare a unei roți dințate de dimensiuni micrometrice utilizând tehnica (LIGA).[54]

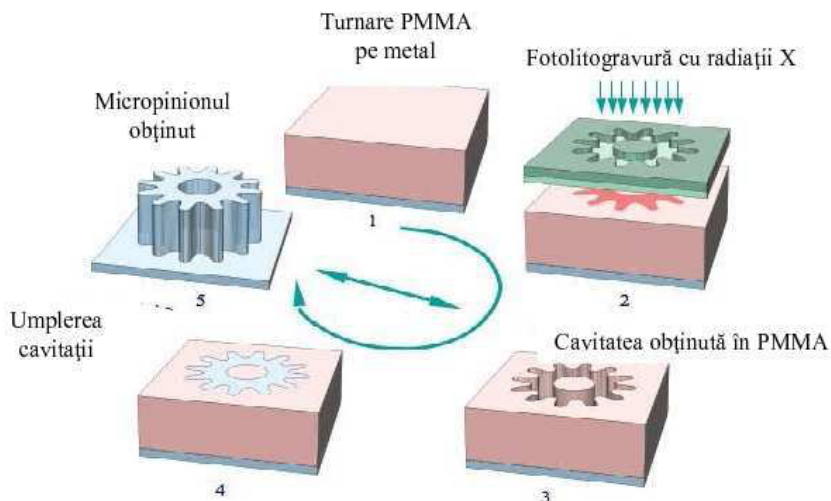


Figura 1.4 Etapele de realizare a unui micropinion utilizând tehnica LIGA.

Microprelucrarea în volum („bulk micromachining”) [42],[66] înseamnă gravarea caracteristicilor în trei dimensiuni în volumul materialelor cristaline și necristaline. În contrast caracteristicile microprelucrate la suprafață sunt construite, strat cu strat, pe suprafața unui substrat (ex. foița de siliciu). Gravarea uscată definește caracteristicile suprafeței în planul x, y, iar cea umedă le separă de plan prin subțaiere. În microprelucrarea suprafețelor, formele din planul x, y nu sunt restricționate de cristalografia substratului.

Pentru ilustrare, în figura 1.5 se compară un senzor de presiune absolută realizat din polisiliciu prin microprelucrarea suprafeței cu unul microprelucrat în volum dintr-un singur cristal de siliciu.

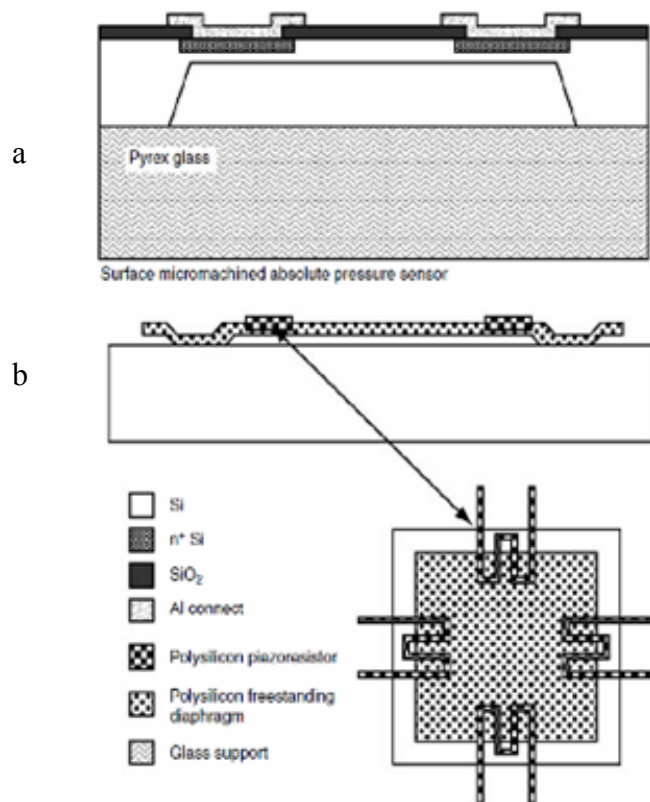


Figura 1.5 Microprelucrarea în volum a unui singur cristal de Si(a), Microprelucrarea la suprafață cu poli-Si(b)

Ceea ce nu este reflectat în figură este faptul că dispozitivele microprelucrate la suprafață ajung să fie mult mai mici decât replicile acestora microprelucrate în volum. Natura proceselor de depunere implicate determină înălțimea maximă a structurilor microprelucrate la suprafață (Hal Jerman, de la EG&G’s IC Sensors, le-a denumit structuri 2.5 D).

Ca și exemplu, peliculele din siliciu policristalin (poli-siliciu) realizate prin depunere de vapori chimici la joasă presiune (LPCVD) au în general o înălțime de câțiva microni, față de microprelucrarea în volum umedă unde doar grosimea foiței limitează înălțimea structurii.

Chiar și cu un control al procesului cel mai bun cu putință, poli-siliciul are câteva dezavantaje ca material față de siliciul monocristalin, printre care o mai mică piezorezistivitate.

O caracteristică importantă a poli-siliciului este aceea că proprietățile de material, cu toate că sunt oarecum inferioare față de cele ale siliciului monocristalin, sunt cu mult superioare celor ale peliculelor metalice, și cea mai importantă este aceea că sunt izotrope. Incertitudinile dimensionale pot fi mult mai importante decât problemele de material. Câteva din problemele enumerate mai sus asociate microprelucrării la suprafață au fost rezolvate prin modificări ale procesului de fabricație și/sau proiectare alternativă, tehnica câștigând rapid interes comercial, în special datorită faptului că este cel mai compatibil proces de microprelucrare cu procesul de fabricare al circuitelor integrate dezvoltat până la ora actuală. În figura 1.6 este prezentat ciclul complet de fabricație a microdispozitivelor electromecanice MEMS.

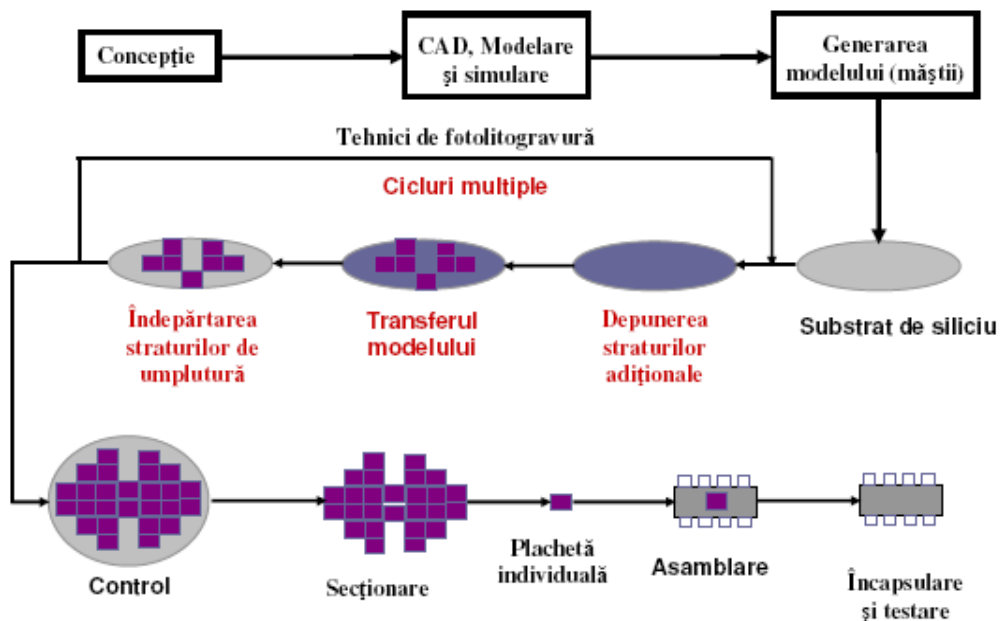


Figura 1.6 Ciclul complet de fabricație a microdispozitivelor MEMS

Un ciclu de fabricare a microdispozitivelor electromecanice MEMS, pornește de la conceperea microdispozitivului electromecanic, urmează modelarea și simularea generării unui model de mască ce se așează pe un substrat din siliciu.

Ulterior, se depun straturile adiționale, apoi urmează transferul modelului cu îndepărtarea straturilor de umplutură, sfârșind cu respectarea unui control adecvat, îndreptându-se spre asamblare, încapsulare și testare.

1.4 Materiale necesare pentru fabricarea microdispozitivelor MEMS

Principalele materiale utilizate în realizarea microdispozitivelor electromecanice MEMS și exemple de aplicații sunt prezentate în tabelul 1.1

Tabel 1.1 Materiale utilizate pentru fabricarea microdispozitivelor MEMS

Material	Caracteristici distincte	Exemple de aplicații
Siliciu monocristalin (Si)	Material electronic de înaltă calitate cu anizotropie selectivă	Senzori piezorezistivi
Siliciu policristalin (polisilice)	Filme de sacrificiu utilizate în fabricarea MEMS	Suprafața micro mașinilor, Actuatori electrostatici
Dioxid siliciu (SiO ₂)	Suprafețe insulare compatibile cu polisiliciu	Straturi de sacrificiu utilizate la realizarea micromașinilor, Straturi de pasivare
Azotati de siliciu (Si ₃ N ₄ , Si _x N _y)	Suprafețe insulare, rezistent chimic, durabilitate mecanică	Straturi de izolație pentru dispozitive electrostatice, straturi de pasivare pentru dispozitive
Germaniu policristalin (poli Ge), Siliciu cu germaniu policristalin (poli Si-Ge)	Depozitat la temperaturi joase	Suprafețe integrate MEMS
Aur (Au), Aluminiu (Al)	Filme fine conductive	Straturi interconectante, straturi de mascare, intrerupătoare mecanice
Nichel -fier (NiFe)	Aliaj magnetic	Actuatori magnetici
Titan-nichel (TiNi)	Aliaj cu memoria formei	Actuatori termici
Carbura de siliciu (SiC) Diamant	Stabilitate electrică și mecanică la temperatură înaltă, inerția chimică	MEMS de înaltă frecvență
Galium arsenid (GaAs), Indium fosfid (InP), Indium arsenid (InAs)	Fante pentru trecerea luminii	Dispozitive optoelectronice
Titanat zirconat (PTZ)	Material piezoelectric	Senzori mecanici și actuatori
Poliamide	Rezistență chimică, polimer cu temperatura înaltă	MEMS flexibile, bioMEMS
Parilen	Polimer biocompatibil, depozitat la temperatura camerei	Straturi de acoperire, structuri polimerice moi

1.5 Aplicații ale microdispozitivelor electro mecanice MEMS

Microdispozitivele MEMS se aplică în diferite sectoare industriale, în mod special în industria automobilelor, industria electronică, domeniul medical, în comunicații, în domeniul de apărare și securitate[14]. Ca produse ce conțin componente de tip microdispozitive MEMS se pot aminti: senzori de presiune, accelerometre, senzori de gaze, valve, duze, senzori biochimici, comutatoare RF, senzori de rotație, microrelee, oscilatoare. În tabelul 1.2 se prezintă câteva exemple de utilizare a microdispozitivelor MEMS, [18].

Tabel 1. 2 Exemple de aplicare a microdispozitivelor MEMS

Automobile	Electronice	Medicale	Comunicație	Apărare
Senzor de navigație internă	Cap de citire driver	Senzor de presiune a sângelui	Componente cu fibre optice de rețea	Orientări muniție
Senzor pentru compresor la aer condiționat	Capete imprimantă cu jet de cerneală	Stimulatori musculari	RF Relee, comutatoare și filtre	Supraveghere
Senzori de frână și accelerometre de control ale suspensiei	Ecran de proiecție la televizoare	Senzori de tensiune arterială implantați	Ecrane de proiecție, dispozitive și instrumente de comunicare portabile	Sisteme de înarmare
Senzori pentru nivelul de combustibil și vapori de presiune	Senzori pentru detectare cutremur pământ	Proteze	Oscilatoare care controlează tensiunea	Senzor încorporat
Senzori pentru airbag	Senzori de presiune în aviație	Instrumente analitice în miniatură		Stocare a datelor
Pneuri inteligente	Sisteme de stocare bază de date	Stimulatoare cardiace	Lasere tunate	Control la aeronave

În figura 1.7 sunt ilustrate zonele de amplasare la un automobil a unor senzori ce au în componența lor microdispozitive MEMS, [42]



Figura 1.7 Dispunerea principalilor senzori la un automobil

Ca un exemplu de succes se menționează modelul BMW 740i care are peste 70 de microdispozitive MEMS pentru sisteme anti-blocare la frânare, suspensie activă și sisteme de control în navigație, monitorizare vibrații, senzori de combustibil, reducerea nivelului de zgomot, de detectare caz de răsturnare, de reținere și de tensionare cu centura de siguranță [111]. În continuare se prezintă câteva exemple de utilizare a microdispozitivelor MEMS.

a. Senzorul de la airbagul automobilelor

Este unul dintre primele dispozitive comerciale care folosesc microdispozitive electromecanice MEMS. Ele sunt răspândite astăzi prin utilizarea, de forma unui singur cip care conține un senzor inteligent, sau accelerometru, ce măsoară decelerarea rapidă a unui vehicul prin lovirea de un obiect. MEMS permite aceeași funcție care urmează să fie realizată prin integrarea unui accelerometru și electronice într-un singur cip de siliciu, rezultând un dispozitiv mic, care poate fi adăpostit în coloana volanului. Senzorul de la airbag este fundamental pentru succesul MEMS și tehnologia microprelucrărilor. Cu peste 60 de milioane de microdispozitive vândute și funcționând în ultimii 10 ani această industrie operează într-un mediu provocator constatându-se o fiabilitate tehnologică ridicată într-un vehicul.

b. Accelerometru

Un alt exemplu este la realizarea accelerometrelor utilizate atât în industria autovehiculelor, cât și în alte aplicații ca detectarea cutremurelor de pământ, jocuri video de realitate virtuală, stimuloare cardiace, unități de disc de înaltă performanță echipamente militare etc. În figura 1.8 este prezentat un accelerometru pe bază de MEMS (a), și un microdispozitiv complet asamblat (b). [98].

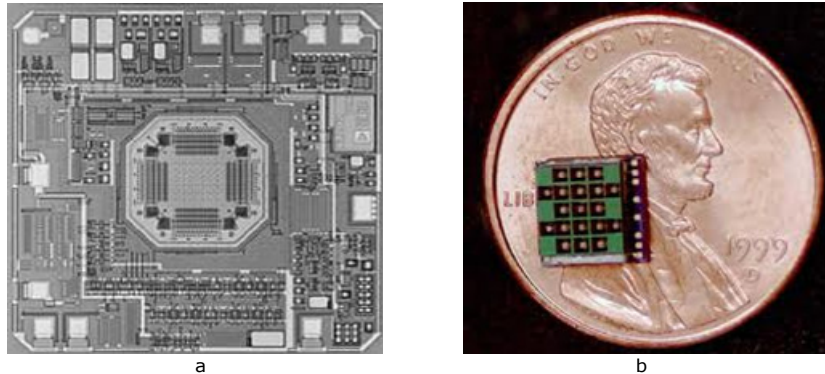


Figura 1.8. Accelerometru pe bază de MEMS (a), și dispozitiv complet asamblat (b)

c. Senzor de presiune medical

Senzorii de presiune sunt cele mai mari aplicații ale microdispozitivelor MEMS în domeniul medical. Senzorul de unică folosință constă dintr-un substrat de siliciu care este îmbinat cu o membrană din siliciu (Figura.1.9), [105]. Se utilizează la microsisteme de măsurare a tensiunii arteriale și sunt introduse intravenos. Atunci când sângele acționează asupra membranei de siliciu a senzorului apare o deformare a membranei ce acționează asupra elementului piezoelectric. Acesta din urmă transformă deformarea mecanică în semnal electric

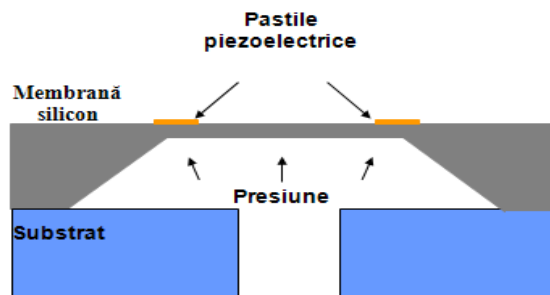


Figura 1.9 Senzorul de presiune medical

În figura 1.10 sunt prezentați senzorii de unică folosință pentru măsurarea tensiunii arteriale[105], sisteme de masurare a tensiunii arteriale[65] și un senzor tip cateter intracardiac de verificare a tensiunii arteriale [102]

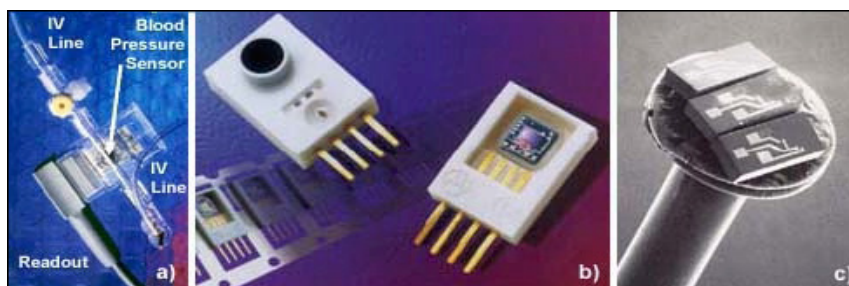


Figura 1.10 Senzor de unică folosință de măsurare a tensiunii arteriale (a), sisteme de măsurare a tensiunii arteriale (b) și senzor tip- cateter intracardiac de monitorizare a tensiunii arteriale(c)

d. Biodispozitiv MEMS

Prin *biodispozitiv* se înțelege un ansamblu de părți electrice, biologice, mecanice, optice-ca elemente active – (traductoare, amplificatoare) și a unor elemente de interconectare, capsule, terminale, microcanale de alimentare cu biolichid – ca elemente de conectare cu mediul extern. Biodispozitivul poate avea funcții complexe, ca detectarea unei anumite substanțe (*biosenzor*), caracterizarea unor materiale biologice, furnizarea unui medicament, sau detectarea multor substanțe (biodispozitiv de tip multisenzor) combinată cu furnizarea de substanțe, vehicularea și manipularea de substanțe, țesuturi [104].

Un exemplu de biodispozitiv este cel utilizat pentru furnizarea insulinei la diabetici. Acest dispozitiv conține ca elemente active: structuri traductoare care detectează nivelul glicemiei și o micropompă pentru insulină. În figura 1.11 este prezentat un sistem ce supraveghează globulele roșii din sânge[107].

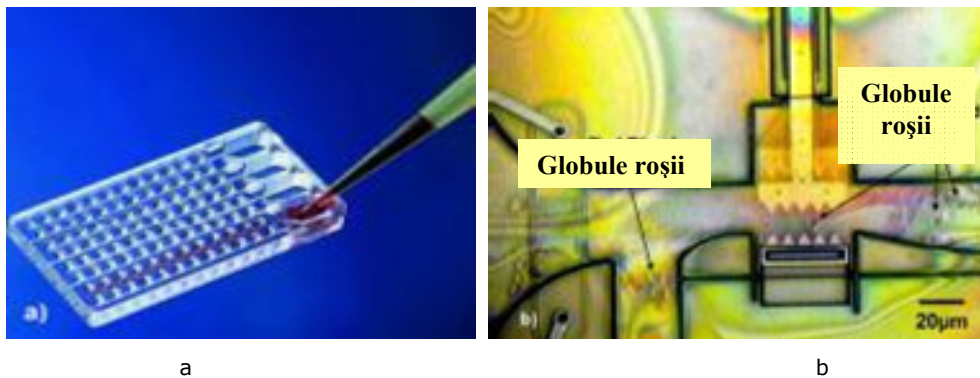


Figura 1.11 Microprelucrări cu 96 cavități umplute cu ajutorul unui capilar (a), și un dispozitiv bioMEMS ce supraveghează globulele roșii din sânge (b).

Un alt *biomicrosistem* electromecanic utilizat în medicină este biosenzorul amperometric de glucoză [84], numit și ROSADG01(figura 1.12). Acesta poate detecta glucoza din sânge în gamă 10-20mM . Este fabricat într-o tehnologie planară ne-standard, utilizând un film subțire anodic de Al₂O₃ drept catalizator și strat absorbant. Detecția se realizează într-un timp mai mic de două minute, iar proiectarea senzorului se bazează pe o celulă Clark cu patru electrozi.

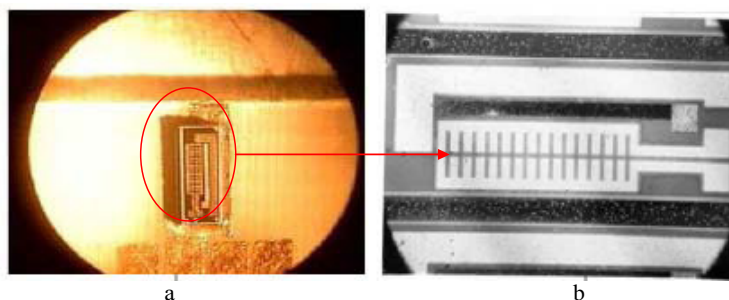


Figura 1.12 Structura biosenzorului(a), detaliu (b).

2. Microîmbinări și procese de microîmbinare

2.1 Microîmbinări – Aspecte generale

Conceptul de microîmbinare a apărut la sfârșitul anilor '50 odată cu dezvoltarea explozivă a domeniului microelectronicii. Trecerea de la tuburile incandescente la tranzistoare și mai apoi la circuite integrate a impus și dezvoltarea de tehnologii de prelucrare aplicabile în situații în care subiectul prelucrării era o componentă a unui circuit electronic având dimensiuni submilimetrice.

Această problemă a devenit și mai stringentă o dată cu apariția conceptelor de Micro-Sistem Electromecanic (Micro-Electro-Mechanical-System, MEMS) și Micro-Sistem Opto-Electromecanic (Micro-Opto-Electro-Mechanical-System, MOEMS). Aceste sisteme erau dispozitive confecționate din componente microscopice amplasate pe un cip semiconductor. Istoria acestor dispozitive este recentă, în sensul că prima dezvoltare de MEMS (cu publicarea caracteristicilor) a avut loc la nivelul anilor 1980 (apariția și dezvoltarea de micro-cip-uri), iar prima comercializare ca produs de sine-stătător a avut loc în anii 1990. Introducerea acestor dispozitive a fost dictată de necesitatea miniaturizării sistemelor electronice. Deja de la primele încercări pentru dezvoltarea MEMS sunt evidențiate următoarele avantaje ale acestor micro-dispozitive:

- insensibilitate la zgomotul electromagnetic
- posibilitatea utilizării în medii cu grad crescut de pericolozitate
- posibilitatea efectuării de măsurători la distanță
- miniaturizare
- posibilitatea unei producții de masă
- cost scăzut (datorită producției de masă).

Dezvoltarea MEMS impune și dezvoltarea de procedee de micro-prelucrare a componentelor MEMS, inclusiv a celor pentru îmbinarea acestor componente. La nivelul anilor '90, a început să fie din ce în ce mai utilizat conceptul de „microîmbinare” [51], deși nu s-a stabilit un consens pentru definiția conceptului de „microîmbinare” și a graniței dintre „îmbinare” și „microîmbinare”. Acest consens lipsește și în prezent.

În literatura tehnică se folosesc următoarele definiții:

- microîmbinările sunt îmbinări având cel puțin una dintre dimensiuni de ordinul sutelor de micrometri
- microîmbinările sunt îmbinări având zone influențate termic cu lățimi de maxim 200μ
- microîmbinările sunt îmbinări la care materialul de adaos este așezat cu precizie, toleranțele localizării materialului de adaos fiind de obicei exprimate în sute de micrometri
- microîmbinările sunt îmbinări realizate pe elemente având cel puțin una dintre dimensiuni maxim de ordinul sutelor de micrometri.

Funcționarea propriu-zisă a unor microdispozitive mecanice și electronice de mici dimensiuni prin felul în care sunt angajate în domeniul aerospațial, medical, al telecomunicațiilor, al computerelor, al automobilelor, precum și industria consumatoare este stringent dependentă de folosirea eficientă și sigură a tehnicilor de microîmbinare.

Domeniul microîmbinării a cunoscut o atenție deosebită în ultimele două decenii devenind o direcție de cercetare de vârf în întreaga lume. Aria tehnicilor de microîmbinare: prin lipire, topire cu fascicul Laser și cu adezivi este utilizată în limitele sale pentru a face față miniaturizării tot mai crescânde, vitezei de procesare și a schimbărilor rapide în ceea ce privește proiectarea microdispozitivelor.

Pe lângă aceasta, există o tendință globală de realizare a produselor, care să nu dăuneze mediului înconjurător, prin tehnicile de asamblare, care converg spre o regândire a termenilor cu privire la modul de utilizare a materialelor, precum și a procedeelelor de microîmbinare și asamblare. Deși, termenul de microîmbinare este intens folosit, acesta este dificil de definit în termeni exacți. Microîmbinarea cea mai des utilizată este între materialele de bază în formă de fir pe un substrat sub forma de folie, a căror grosime nu depășește 500 μ m.

Asamblarea prin microîmbinare a firelor tip bilă/pană pe folie substrat se realizează între interconexiunea unui fir din aur și un chip din siliciu (procedeu de microîmbinare termosonică), iar încapsularea între capacul din polimer și suportul MEMS se realizează prin procedeu de microîmbinare prin încălzire cu fascicul Laser. De altfel, domeniul micro și nanotehnologia în care este inclusă și microîmbinarea reprezintă, în prezent, un domeniu de cercetare de vârf, susținut atât prin ample programe de cercetare finanțate public la nivel european, cât și prin participarea marilor firme care activează în domeniu. Având în vedere importanța acestui domeniu Institutul Internațional de Sudură IIW, societatea care reunește institutele și asociațiile de sudură din 54 țări, a creat în anul 2011 o comisie tehnică specială care se ocupă exclusiv de problemele de micro și nanoîmbinare.

În „Cartea albă a sudării” elaborată de IIW se menționează că domeniul microtehnologiei este fundamental pentru o clasă largă de produse, un element cheie pentru dezvoltarea acestui domeniu fiind tehnologia de microîmbinare [101].

Există o serie de oportunități semnificative pentru a crește volumul de utilizare al sudării în scopul rezolvării noilor probleme legate de îmbinare (de exemplu, cele specifice dispozitivelor complexe multifuncționale), pentru a reduce costurile și impactul asupra mediului (procese cu consum de energie scăzut, materiale ecologice, reciclare cu impact scăzut). Principalele provocări actuale pentru a asigura o adaptare a tehnologiilor de îmbinare pentru domeniul microtehnologiei sunt:

- reducerea dimensiunii sistemelor de sudare și prindere pentru a permite adaptarea la geometria redusă și îmbinarea automatizată
- dezvoltarea unor noi procese de sudare, mai ales pentru îmbinarea unor materiale foarte subțiri cu comportare la sudare dificilă (de exemplu, Al-SiC cu grosime sub 0,5 mm),
- dezvoltarea unor tehnologii de inspecție și validare acceptate de clienți.

2.2 Microîmbinări specifice dispozitivelor electromecanice MEMS

Primele și totodată majoritatea aplicațiilor proceselor de microîmbinare aparțin domeniului dispozitivelor de tip MEMS[19]. Un dispozitiv de tip MEMS conține cel puțin trei îmbinări dintre care una este dublă:

- asamblarea suportului MEMS pe placa circuit de bază,
- îmbinarea capacului de închidere cu suportul MEMS (încapsularea MEMS)
- microîmbinarea dintre elementele de interconexiune cu MEMS și cu circuitul plăcii de bază (îmbinare dublă), conform figurii 2.1.

Deși fiecare dintre cele trei microîmbinări are importanța ei, îmbinarea care poate afecta grav funcționarea MEMS este microîmbinarea de încapsulare.[23]. O microîmbinare de încapsulare care să aibă o rezistență mecanică scăzută sau să fie neetanșă sau la realizarea careia se degajează o cantitate importantă de fum în interiorul capsulei reprezintă un factor de risc ridicat pentru funcționarea dispozitivului electromecanic al MEMS.

Funcțiile asamblării elementelor din componența MEMS sunt următoarele:

- Interconexiuni electrice, optice și de fluide între dispozitivul MEMS și mediu
- Protejarea dispozitivului MEMS împotriva contaminării, coroziunii și deteriorărilor
- Asigurarea unui mediu cu o stabilitate ridicată pentru funcționarea corespunzătoare a sistemului.

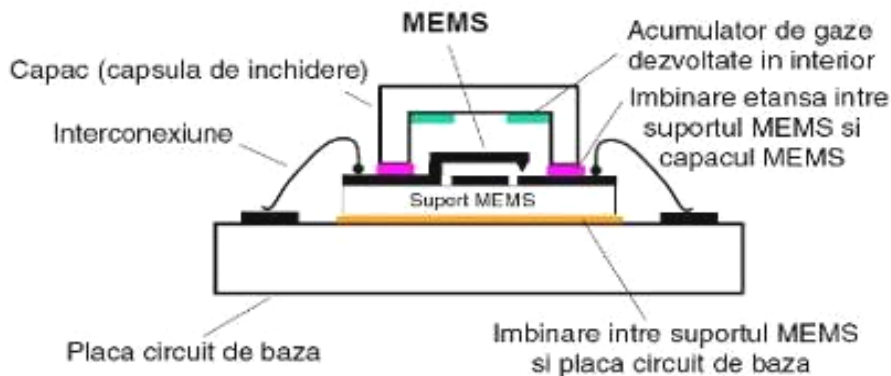


Figura 2.1 Dispozitiv microelectromecanic (MEMS)

Analizând importanța acestor funcții devine justificată necesitatea de a asigura microîmbinărilor un nivel ridicat al calității. În general, cerințele de calitate impuse microîmbinărilor din componența MEMS sunt următoarele:

- *Microîmbinarea* trebuie să aibă o rezistență suficient de mare încât să reziste la solicitările la care este supusă: tensiuni și deformații datorate diverselor procese tehnologice la care este supus ansamblul, solicitări termice, solicitări introduse de anumite componente aflate în mișcare, funcționarea în condiții speciale (senzori funcționând la presiuni mari)
- *Microîmbinarea* trebuie să fie etanșă, astfel încât elementele funcționale ale MEMS să nu fie afectate de accesul nedorit al eventualelor gaze, lichide sau impurități solide nano-dimensionale; cantitatea de gaze emise în timpul procesului de microîmbinare trebuie să fie minimă
- *Microîmbinarea* trebuie să aibă un aspect estetic și o dimensiune redusă care să nu afecteze funcționarea dispozitivului MEMS.

2.2.1 Microîmbinări pentru contacte electrice

Conexiunile componentelor electrice de tip MEMS sunt realizate prin intermediul unor conductori electrice având diametre sub $400\mu\text{m}$ [27]. Îmbinarea acestora se realizează prin sudare sau lipire, îmbinarea efectivă trebuie să aibă rezistențe electrice de valoare redusă pentru a limita pierderile de energie. De regulă, conexiunea este realizată între o sârmă de aluminiu, cupru, aur sau argint și un substrat (PAD) din cupru sau aluminiu. figura 2.2. În acest caz

îmbinarea se realizează prin procedeul de microîmbinare termosonică de tip „pană”. Este utilizată, de asemenea, microîmbinarea între conductori metalici.

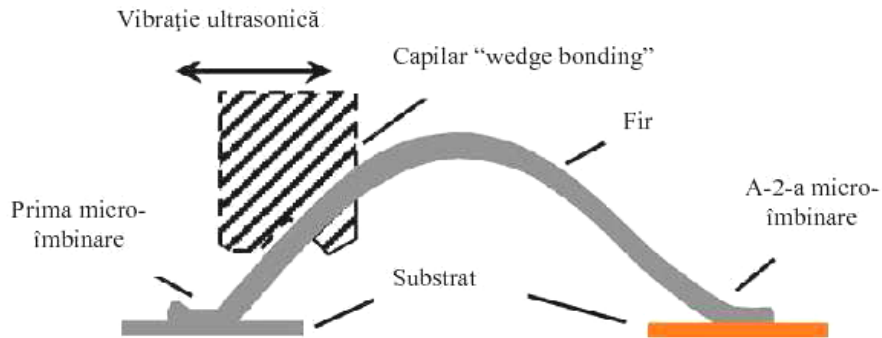


Figura 2.2 Microîmbinări pentru contacte electrice

2.2.2 Microîmbinări pentru încapsulare

Încapsularea MEMS este necesară pentru protecția micro dispozitivului (contaminare, coroziune, deteriorare) și pentru a asigura funcționarea lui sigură într-un mediu cât mai stabil, îmbinarea de încapsulare fiind prezentată în figura 2.3, [2]. O variantă utilizată în prezent, pentru realizarea îmbinării pentru încapsularea microdispozitivelor este prin sudare cu Laser, soluție care asigură o încălzire la o temperatură relativ redusă a materialului, ceea ce o face aplicabilă și pentru microdispozitive MEMS ce folosesc inele de etanșare din polimer, [86].

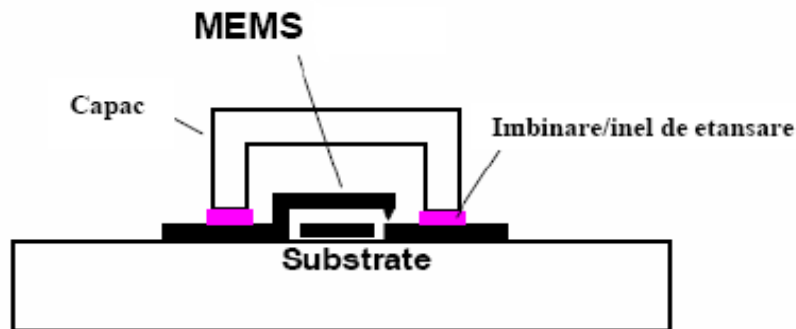


Figura 2.3 Îmbinare de încapsulare a microdispozitivului MEMS

Încapsularea microdispozitivelor MEMS se poate executa din materiale polimerice sau metalice. În figura 2.4 este prezentată o încapsulare a dispozitivelor MEMS în capsule metalice din nichel, [13].

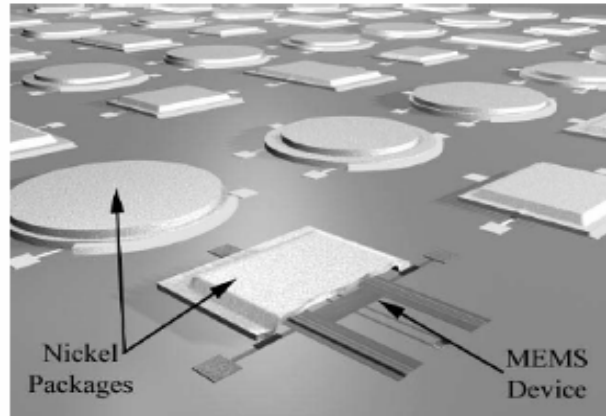


Figura 2.4 Încapsularea MEMS cu capsule din nichel

În figura 2.5 este prezentată o microîmbinare prin lipire eutectică a capsulei de suportul circuitului, la un microdispozitiv electromecanic MEMS

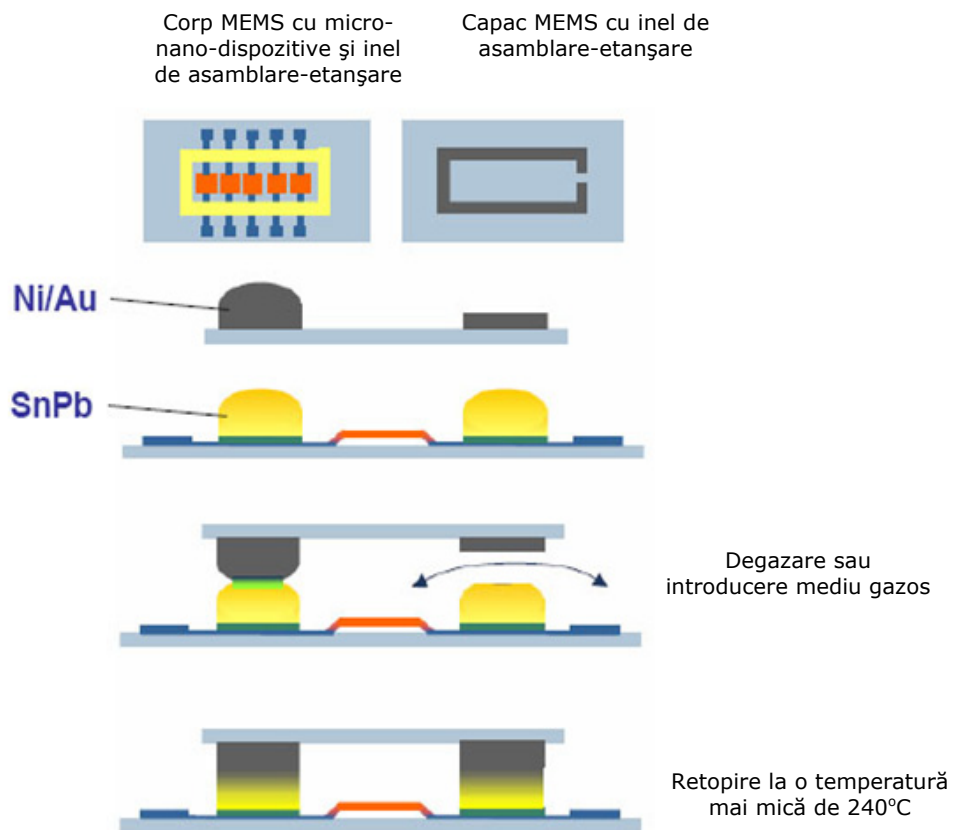


Figura 2.5 Microîmbinarea prin lipire a capsulei cu suportul circuitului la MEMS

Microdispozitivele MEMS pot fi încapsulate în două moduri prezentate în figura 2.6 și anume, fie utilizând o capsulă de folie subțire (a), fie o capsulă mai groasă ce se va îmbina pe un substrat (b), [9].

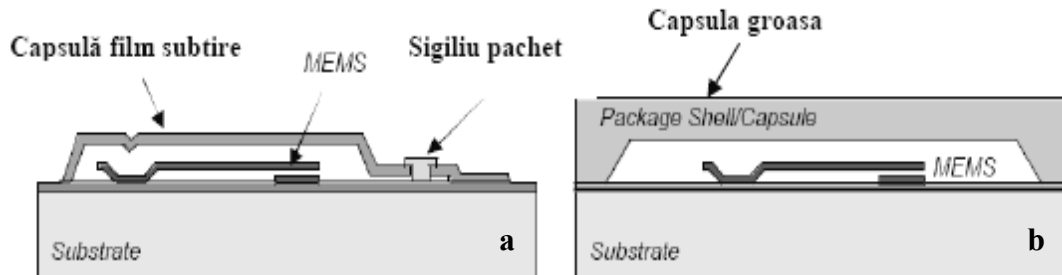


Figura 2.6 Modalități de încapsulare MEMS: capsulă folie subțire(a), capsulă groasă îmbinată pe substrat(b)

2.2.3 Microîmbinări între suportul MEMS și placa de bază

Microîmbinarea între suportul MEMS și placa circuitului de bază este ilustrată în figura 2.7.

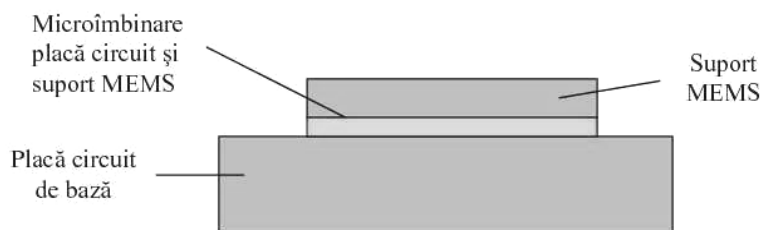


Figura 2.7 Schița de microîmbinare între suportul MEMS și placa circuit de bază

Această microîmbinare se realizează în mod curent printr-un procedeu de microlipire eutectică folosind aliaje de lipit ecologice fără plumb.

2.3 Procedee de microîmbinare a componentelor MEMS

În prezent cele mai des utilizate procedee pentru microîmbinarea componentelor unui microdispozitiv MEMS sunt:

- Microîmbinare anodică (Anodic bonding)
- Microîmbinare cu sticlă sinterizată (Frit glass bonding)
- Microîmbinare prin lipire (Solder Bonding):
 - Microîmbinarea prin lipire cu polimer (Polymer solder bonding)
 - Microîmbinarea prin lipire cu adezivi (Adhesive solder bonding)
- Microîmbinare eutectică (Eutectic bonding)
- Microîmbinare prin topire cu fascicul Laser (Fusion Laser bonding)
- Microîmbinare termosonică (Thermosonic bonding), [11].

Principalele caracteristici ale acestor procedee de microîmbinare cum ar fi temperatura de preîncălzire sau temperatura de proces, etanșeitarea microîmbinărilor mai ales în cazul încapsulării microdispozitivelor MEMS, fiabilitatea și rezistența mecanică a microîmbinării sunt prezentate în tabelul 2.1

Tabel 2.1 Caracteristicile procedeele de microîmbinare a componentelor MEMS

PROCEDEU MICRO ÎMBINARE	TEMPERATURA MICRO ÎMBINARE [°C]	ETANȘEITATE	FIABILITATE	REZISTENȚA MECANICĂ MICRO ÎMBINARE [MPa]	OBSERVAȚII
Micro îmbinare anodică	200...500	DA	Bună	> 30	Necesită suprafețe de îmbinare plane și netede ($\sim 1 \mu\text{m}$) și valori mari pentru tensiunea de alimentare ($\sim 1 \text{kV}$)
Micro îmbinare prin topire	700...1400	DA	Bună	> 20	Necesită suprafețe de îmbinare plane și netede ($\sim \text{nm}$)
Micro îmbinare eutectică	180...400	DA		20	Necesită straturi intermediare
Micro îmbinare cu sticlă sinterizată	> 400	DA	Bună		Utilizabilă în cazul suprafețelor de îmbinare ne-plane și rugoase
Micro îmbinare prin lipire	100...300	DA	Bună		Utilizabilă în cazul suprafețelor de îmbinare ne-plane și rugoase și necesită straturi intermediare de adeziune
Micro îmbinare prin încălzire cu Laser	300	NU		15...20	Costuri reduse și facilitate în operare
Micro îmbinare cu polimeri BCB	300	NU		> 20	Utilizabilă în cazul suprafețelor de îmbinare ne-plane și rugoase, costuri reduse și facilitate în operare

Avantajele importante ce se regesc la procedeele de microîmbinare a componentelor dispozitivelor electromecanice MEMS sunt prezentate în tabelul 2.2

Tabel 2.2 Avantajele procedeeleor de microîmbinare a componentelor MEMS

Procedee (tehnici, metode)		Avantaje	Caracteristici
Imbinare "de suprafata"		Etans	Necesara suprafata plana
	Anodica	Imbinare cu rezistenta ridicata	Tensiune mare
	Topire (Direct)	Imbinare cu rezistenta ridicata	Temperatura ridicata
	Suprafata activa	Variate	Variate
Strat intermediar metalic		Etans Suprafata ne-plata	Necesare metale specifice
	Eutectica	Imbinare cu rezistenta ridicata	Necesara suprafata plana
	Termocompresiune	Suprafata ne-plata	Fora cu valoare mare
	Lipire	Auto-aliniere	Posibila curgerea metalului de lipire
Strat intermediar izolator		Suprafata ne-plana	Variate
	Sticla sinterizata (aglutinata)	Etansa Uzual la MEMS	Suprafata mare Temperatura medie-mare
	Adeziv	Universal	Ne-etans

Limitele procedeeleor de microîmbinare enumerate sunt următoarele:

- Temperatura maximă de operare în timpul proceselor de microîmbinare studiate pentru fabricarea microdispozitivelor electromecanice MEMS este de 240°C. Această temperatură este limitată, din cauza utilizării la imbinare a unor materiale polimerice folosite la încapsularea microdispozitivelor MEMS, sau la etanșarea lor cu ajutorul inelelor de etanșare din polimer. Depășind această temperatură, există riscul de deteriorare a acestor componente, și din această cauză este nevoie de o limitare strictă de temperatură. La procedeul de microîmbinare anodică temperatura de operare are valori între 200-500°C, la microîmbinarea cu sticlă sinterizată, temperatura va fi mai mare de 400°C iar la microîmbinarea prin topire a metalelor, acolo unde nu sunt materiale polimerice, temperatura procesului va fi cuprinsă între 700-1400 °C.
- Unele procedee se aplică doar la materiale metalice, altele doar la materiale nemetalice altele atât la materiale metalice cât și la materiale nemetalice.
- Grosimile materialului de bază sunt relativ mici de ordinul 50-500μm, fiindcă puterile termice vehiculate sunt foarte mici.
- Unele procedee sunt dificil de aplicat în regim manual, datorită pretențiilor ridicate în ceea ce privește precizia de derulare a procesului.

3. Microîmbinare prin lipire eutectică

3.1 Microîmbinarea eutectică

Procesul de microîmbinare eutectică are o vechime considerabilă. Analizându-se o serie de artefacte antice recuperate din vechile piramide egiptene s-a observat că majoritatea obiectelor de cult metalice erau asamblate cu ajutorul unui aliaj Au-Sn având o temperatură de topire scăzută. Această idee a fost preluată și utilizată într-o formă științifică sub numele de „îmbinare eutectică” pentru prima dată în anul 1960, [112].

În cazul îmbinării eutectice lipirea se realizează utilizând ca material de adaos aliajul eutectic format cu elemente provenind de la cele două componente de îmbinat. Principiul procedurii de îmbinare eutectică constă în inițierea unei reacții eutectice între materialul sau materialele de bază și aliajul de îmbinare. Acest principiu exploatează faptul că temperatura eutectică a unui sistem de aliaje corespunde celei mai mici temperaturi de topire a sistemului de aliaje respectiv. Astfel, dacă cele două materiale care se îmbină pot forma un aliaj eutectic ele se pot îmbina la o temperatură relativ scăzută fără utilizarea unui material de adaos suplimentar. Acesta este cazul, spre exemplu, al combinației Ag-Cu, Figura 3.1, fiind posibilă îmbinarea eutectică a unor componente din cupru utilizând un material de adaos pe bază de argint, [43].

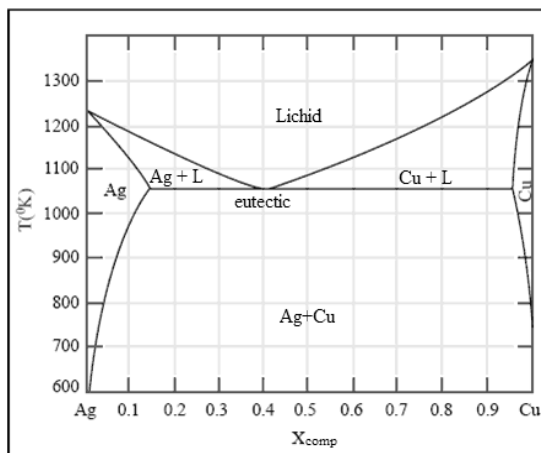


Figura 3.1 Diagrama de fază a aliajului Ag-Cu

În practică, însă, o asemenea situație se întâlnește rar și, de aceea, este necesară în majoritatea cazurilor utilizarea unui al treilea material ales în mod corespunzător, astfel încât să formeze eutectic(i) cu materialul sau materialele de bază ce trebuie îmbinate.

În cazul în care cele două materiale de bază nu pot realiza aliaje eutectice cu un al treilea material există posibilitatea rezolvării problemei prin depunerea pe suprafețele de îmbinat a unui strat subțire dintr-un material adecvat care pot forma un aliaj eutectic împreună cu materialul de bază. Pentru a declanșa reacția eutectică

este necesară aducerea elementelor de îmbinat în contact ferm și încălzirea lor la temperatura eutectică. Caracteristica principală favorabilă a microîmbinării eutectice este faptul că temperatura la care are loc reacția de formare a aliajului eutectic este mai mică decât temperaturile de topire ale celor două materiale de bază, astfel încât topirea materialului și realizarea îmbinării va avea loc strict la interfața dintre cele două elemente pe o grosime de ordinul micronilor. Cel mai uzual sistem binar formator de aliaj eutectic, utilizat la fabricarea de MEMS, este sistemul aur - siliciu (Au-Si), [48]. Acesta formează eutecticul cu compoziția masică 97.1 mas % Au - 2.85 mas % Si, eutectic care are temperatura de topire 363°C. În practică există însă și eutectici care au temperatura de formare chiar mai mică decât aliajul menționat. Un astfel de eutectic este eutecticul sistemului staniu-plumb (Sn-Pb) cu temperatura de formare de 183°C.

Un alt eutectic des întâlnit în fabricarea de MEMS este eutecticul sistemului aluminiu - siliciu (Al-Si), eutectic care se formează la temperatura de 577°C. Este dificil să se determine și să se controleze grosimea nominală a stratului de aliaj de lipit care participă la realizarea reacției eutectice. Din acest motiv, de cele mai multe ori, grosimea stratului de aliaj de lipit se alege mai mare decât grosimea nominală, fapt care conduce la existența, după formarea îmbinării, a unui strat cu o grosime de ordinul μm între cele două volume de eutectic formate în timpul reacției. Etanșeitatea îmbinării eutectice este ridicată, ea depinzând de uniformitatea stratului de aliaj de îmbinare depus pe suprafețele de îmbinare ale materialelor de bază.

3.2 Tipuri de microîmbinări eutectice

3.2.1 Microîmbinări eutectice cap la cap

Microîmbinările cap la cap sunt, în general, dificil de realizat, deoarece este necesară o poziționare foarte precisă a elementelor de îmbinat. De aceea, aceste microîmbinări sunt utilizate, de regulă, doar în cazurile în care nu se pot folosi microîmbinări suprapuse. În cazul microîmbinării cap la cap a unor folii (figura 3.2) acestea trebuie să aibă o suprafață plană fără deformații sau neregularități ale suprafețelor de contact. Curățirea suprafețelor înainte de realizarea îmbinării trebuie realizată mecanic prin șlefuire cu hârtie abrazivă având o granulație suficient de fină încât să nu afecteze negativ procesul de umectare din timpul îmbinării.



Figura 3.2 Microîmbinarea eutectică cap la cap

O microîmbinare eutectică cap la cap, se realizează și în cazul firelor având dimensiuni de ordinul 100-400 μm . În figura 3.3 este prezentată succesiunea de operații specifice procesului de microîmbinare eutectică cap la cap a unor fire din cupru, aur sau argint.

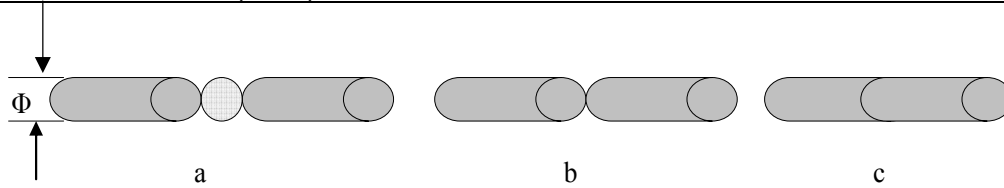


Figura 3.3 Microîmbinarea eutectică a firelor: poziționarea celor două fire din cupru pe aceeași axă orizontală (a), aducerea în contact a aliajului de lipit topit (b), realizarea microîmbinării firului de cupru (c)

Microîmbinarea eutectică cap la cap a foliilor din cupru cu grosime sub 1 mm se mai poate realiza și cu prelucrarea suprafeței de îmbinare sub formă oblică sau cu o prelucrare în trepte, așa cum este prezentat în figura 3.4

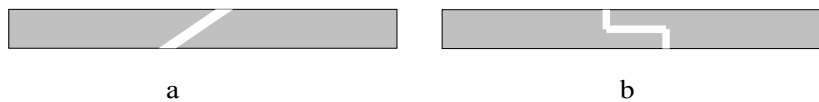


Figura 3.4 Microîmbinarea eutectică cap la cap cu prelucrare oblică (a), respectiv în trepte(b)

3.2.2 Microîmbinări eutectice prin suprapunere

Microîmbinările prin suprapunere (figura 3.5) sunt cele mai întâlnite la realizarea de structuri, care trebuie să prezinte o rezistență mecanică relativ ridicată. Rezistența microîmbinării este proporțională cu mărimea suprafeței pe care se realizează suprapunerea celor două materiale de bază

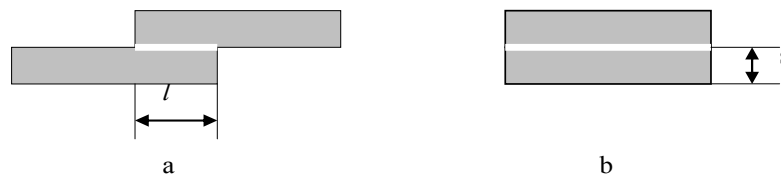


Figura 3.5 Microîmbinări eutectice prin suprapunere. Lamele din cupru suprapuse pe o anumită lungime l (a), lamele din cupru suprapuse pe toată lungimea componentei (b)

Lungimea minimă a suprapunerii celor două componente (l_{min}) depinde de grosimea materialului de bază. Se recomandă ca această mărime să fie egală cu de trei ori grosimea materialului de bază cel mai subțire, h_{min} ($l_{min} = 3 \times h_{min}$)[53]. În cazul unor componente cu grosime diferită, o îmbinare directă este de evitat întrucât datorită efectului de creștătură, rezistența îmbinării la încovoiere este redusă. În astfel de cazuri, se recomandă prelucrarea componentei de grosime mai mare, până la nivelul componentei subțiri și realizarea îmbinării între două elemente cu aceeași grosime în secțiunea de îmbinat. În figura 3.6 sunt prezentate două tipuri de microîmbinări prin suprapunere aplicate pentru îmbinarea a două folii subțiri din cupru, [74]. În cazul prezentat în figura 3.6.a este combinată o îmbinare prin suprapunere cu o îmbinare în colț (2) și în colț, în timp ce îmbinarea din figura 3.6 b este realizată exclusiv prin suprapunere.

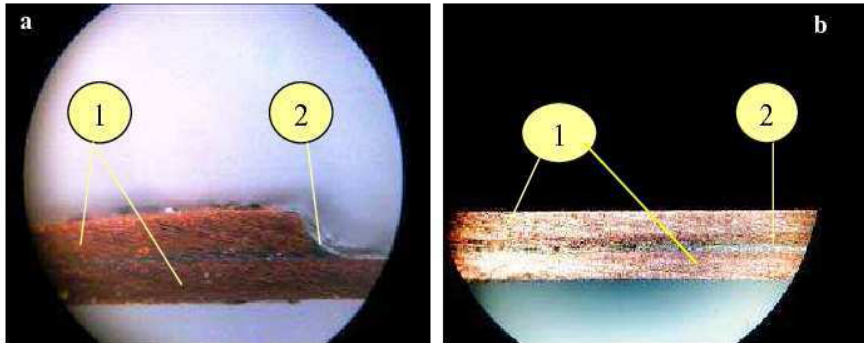


Figura 3.6 Microîmbinări eutectice prin suprapunere și în colț (a.) și prin suprapunere (b.) ,
1- componente de lipit, 2 – imbinare lipită

3.2.3 Microîmbinări eutectice în colț

Microîmbinările eutectice în colț sunt realizate în L sau în T (figura 3.7), unghiul dintre componente fiind 60-120°. Microîmbinările eutectice în colț, sunt utilizate atunci când este nevoie de o consolidare ridicată a îmbinărilor. Dacă aceste componente au grosimi mai mici de 1 mm, componenta suprapusă se îndoaie în formă de L (figura 3.7 a).

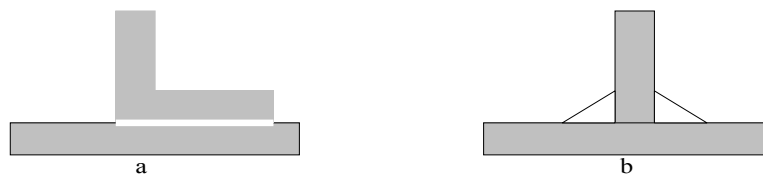


Figura 3.7 Microîmbinări eutectice în colț în L (a), respectiv în T (b)

Calitatea microîmbinărilor în formă de T se recunoaște după modul de racordare a aliajului deșus în colțurile îmbinării (fig.3.8). Dacă aliajul de lipit formează o racordare lină, concavă a microîmbinării atunci îmbinarea poate fi considerată corespunzătoare.

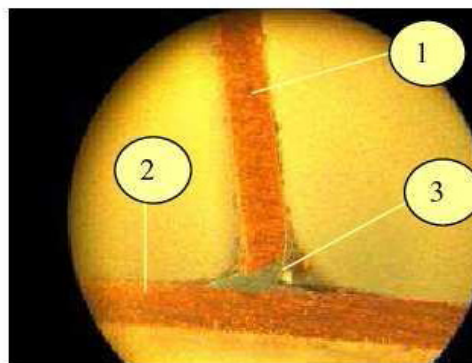


Figura 3.8 Microîmbinare eutectică în colț în formă de T
(1) și (2) - componentele de îmbinat, (3) – îmbinare lipită

3.3 Tehnologia microîmbinării eutectice

3.3.1 Surse termice și moduri de încălzire utilizabile la microîmbinarea eutectică

Principalele metode de încălzire utilizate în practica industrială pentru operații de lipire sunt următoarele:

- Încălzire directă cu sursă termică rezistivă
- Încălzire cu jet de aer cald
- Încălzirea cu impulsuri de căldură
- Încălzire cu radiații infraroșii.

Procesul de încălzire a materialului la temperatura de imbinare trebuie strict controlat atât din punct de vedere al temperaturii maxime care se va atinge, cât și din punct de vedere al vitezei de încălzire. Despre limitarea superioară a temperaturii s-a discutat anterior în capitolul 2. În ceea ce privește viteza de încălzire aceasta poate influența nivelul de deformare sub solicitare termică a anumitor componente ale MEMS, componente aflate în imediata vecinătate a locului în care se aplică aliajul de imbinare. Din acest motiv, pentru a diminua deformațiile componentelor MEMS este de dorit o limitare superioară a vitezei de încălzire.

3.3.1.1 Încălzirea directă cu sursă termică rezistivă

Încălzirea directă constă în topirea aliajului de imbinare prin contact direct între o sursă termică rezistivă și aliajul de imbinare. Contactul se va realiza pe o perioadă de timp suficient de mare încât să permită aliajului de imbinare să umecteze corespunzător suprafețele materialelor de bază. Pe cât posibil, sursa termică se va menține fixă, iar dimensiunea contactului se va alege în funcție de viteza de încălzire dorită.

În procesele de microîmbinare eutectică manuală ca dispozitiv de încălzire se utilizează în mod uzual un ciocan pentru lipire clasică având o funcționare continuă[113]. Utilizarea unui dispozitiv de termostatare a elementului de încălzire, pe lângă mărirea duratei de funcționare a sursei, permite realizarea unor imbinări de bună calitate fără o deteriorare a componentelor electronice. Forma și caracteristicile vârfului activ al sursei au o influență directă asupra performanțelor respectivei surse. În vederea reducerii proceselor de coroziune și pentru prelungirea duratei de viață a sculei de încălzire, suprafața activă a acesteia poate fi acoperită prin argintare, nichelare sau aluminizare.

3.3.1.2 Încălzirea cu jet de aer cald

Această metodă de încălzire este utilizată în cazul suprafețelor relativ mari, cu dimensiuni de ordinul milimetrilor sau centimetrilor pătrați. Un jet de aer cald aflat la o temperatură superioară celei de imbinare cu aproximativ 20-30° C este suflat cu viteză către suprafețele care participă la imbinare. Pe aceste suprafețe se așează aliajul de imbinare aflat sub diverse forme (bilă, sârmă, folie). Sub acțiunea jetului de aer cald temperatura aliajului de lipire crește relativ rapid până la punctul de topire a acestuia. Jetul de aer cald se menține până la asigurarea umectării integrale a suprafeței de imbinare.

3.3.1.3 Încălzirea cu impulsuri de căldură

Metoda de încălzire constă în emiterea unui tren de impulsuri de căldură (sursa termică fiind comandată electronic)[113], astfel încât, în timp, materialul să suporte un ciclu termic bine determinat, construit de către impulsurile pe care le-a primit.

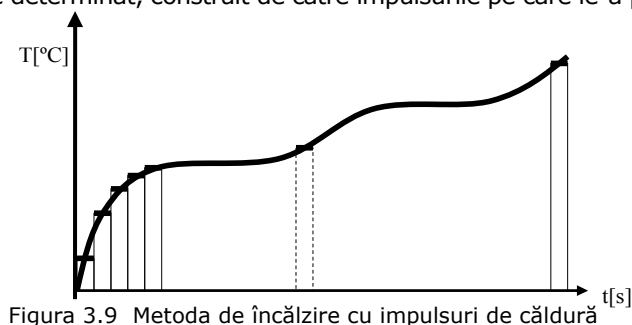


Figura 3.9 Metoda de încălzire cu impulsuri de căldură

Metoda se aplică utilizând dispozitive de încălzire specializate, comandate de controlere. Profilarea prin impulsuri de căldură este o metodă recomandată pentru a încălzi substraturile cu conductibilitate termică scăzută (de obicei substraturi din ceramică sau aluminiu ce au suprafețe mai mici de 1 cm pătrat), a căror încălzire necesită un control superior al fluxului termic.

3.3.1.4 Încălzirea cu radiații infraroșii

Încălzirea cu radiații infraroșii[113] se utilizează în mod frecvent fiind realizată în următoarele variante:

- cu încălzire locală (figura 3.10.a), caz în care radiațiile sunt focalizate în punctele de lipire;
- cu încălzire globală (figura 3.10.b), radiațiile fiind dirijate asupra întregului ansamblu.

Acest procedeu de încălzire este foarte flexibil și ecologic, fluxul radiant putând fi controlat ușor și precis, iar zonele de îmbinare nu sunt în contact cu sursa de căldură. Procesul de îmbinare se poate derula în atmosferă inertă (azot), iar costul echipamentelor și al întreținerii acestora este relativ redus.

Sursele de radiații infraroșii pot fi amplasate deasupra zonei de îmbinare, sub zona de îmbinare sau combinat (în ultimele două cazuri convecția contribuind într-o anumită măsură la încălzire, mai ales la preîncălzire). Principalul avantaj al îmbinării cu radiații infraroșii focalizate constă în posibilitatea de a controla valoarea și distribuția temperaturii într-o anumită zonă, ceea ce permite lipirea în flux continuu a pieselor dintr-un ansamblu în care se folosesc aliaje de lipire cu puncte de topire diferite.

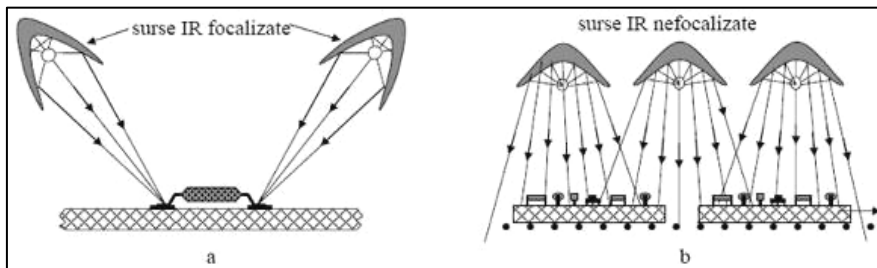


Figura 3.10 Încălzirea cu radiații infraroșii cu încălzire locală (a) sau încălzire globală (b)

În același timp însă, în cazul în care focalizarea radiației nu se plasează cu precizie în zonele de îmbinare, apare pericolul de supraîncălzire și avariere a elementelor de îmbinat. În general, poziționarea precisă a focarului este dificilă, în practică pot apărea zone „umbrite” în care radiația infraroșie nu poate ajunge și, ca urmare, încălzirea nu poate fi realizată în mod corespunzător. În același timp, echipamentele necesare pentru această variantă, sunt complicate și scumpe, motive pentru care varianta cu încălzire locală este relativ rar utilizată.

Varianta de încălzire globală cu radiații infraroșii, este utilizată pe scară largă. Ea se remarcă prin simplitatea echipamentelor de încălzire, simplitatea procedurii de operare și ușurința modificării condițiilor de lucru. Cu aceeași instalație de încălzire se pot realiza atât preîncălzirea, cât și microîmbinarea propriu-zisă.

Varianta de încălzire globală cu radiații prezintă, însă, și o serie de dezavantaje dintre care se menționează următoarele:

- Întrucât materialele utilizate pot avea coeficienți de absorbție diferiți este posibil ca suportul sau unele piese învecinate zonei de lucru să se încălzească mai mult decât zonele țintă putând astfel apărea deteriorări ale elementelor învecinate, aparținând structurii din care face parte microîmbinarea;
- La îmbinarea unor elemente având configurații diferite pot apărea diferențe mari de absorbție a radiațiilor infraroșii, ceea ce impune modificarea regimului energetic al surselor.

3.3.2 Pregătirea componentelor de bază înaintea procesului de microîmbinare eutectică

Un aspect tehnologic important la microîmbinarea eutectică îl constituie componentele care urmează a fi îmbinate pentru a asigura umectarea corespunzătoare a materialului de bază. Într-o microîmbinare eutectică materialul de adaos interacționează cu metalul de bază. Inițierea acestor reacții este posibilă numai dacă între aliajul depus și materialul de bază există un contact intim, dat în principal de o bună pregătire a materialului de bază. Înaintea depunerii aliajului de microîmbinare, este necesară, curățarea suprafețelor participante la microîmbinare operație care se face local, utilizând fluxuri speciale sau global, prin imersarea elementului respectiv în solvenți dedicați.

Pentru realizarea unei îmbinări de calitate, este necesară asigurarea planeității suprafețelor pe care se va realiza depunerea aliajului de lipit. O planeitate redusă va impune necesitatea depunerii unei cantități mai mari de aliaj de lipit, fapt care poate afecta rezistența mecanică a microîmbinării, poate contribui la reducerea volumului de eutectic creat ca urmare a modificării raportului masic dintre aliajul de lipit și materialul de bază, precum și la creșterea costurilor îmbinării prin creșterea consumului de aliaj de lipire, acesta fiind relativ scump. Suprafețele aflate în contact trebuie să permită aliajului de lipit să umecteze materialele de bază, fără să aibă loc scurgeri de material.

Pentru o umectare corespunzătoare unghiul de contact trebuie să aibă valori cât mai mici, figura.3.11. Linia de separație dintre umectare “corespunzătoare” și “necorespunzătoare” se consideră în mod normal a fi un unghi de contact de 90° [113]. Se apreciază că umectarea este corespunzătoare dacă stratul de aliaj umectat are o grosime constantă (de ordinul zecilor de micronetri) pe întreaga suprafață de îmbinat. Prezența unor oxizi pe suprafața materialului de bază are ca efect o scădere a unghiului de contact. Straturile de pasivare afectează, de asemenea, umectarea prin aceea că formează bariere între aliajul de lipit și metalul de bază.

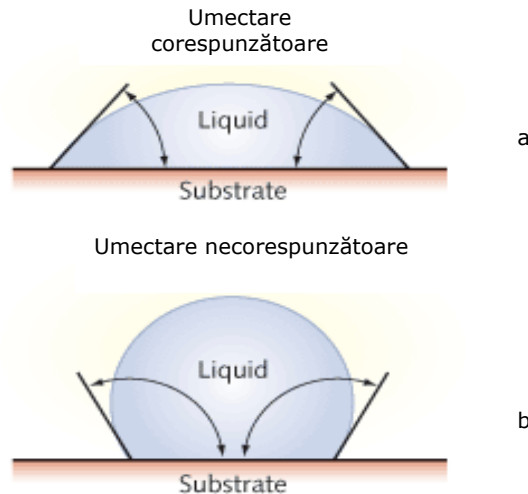


Figura 3.11 Umeectare corespunzătoare(a) și necorespunzătoare a materialului de bază(b) [5]

Alte substanțe contaminante pot fi substanțele uleioase pe bază de siliciu, precum și substanțele organice. Acestea sunt relativ frecvente și pot forma, de asemenea, bariere în calea procesului de umectare printr-o comportare asemănătoare straturilor de pasivare.

3.3.3 Parametrii tehnologici și influența asupra caracteristicilor îmbinărilor eutectic

La procedeul de microîmbinare eutectică cu element rezistiv, procedeu utilizat în cele mai

multe cazuri, principalii parametri tehnologici de îmbinare ce influențează caracteristicile

microîmbinărilor eutectice sunt:

- Temperatura de încălzire a aliajului de îmbinare
- Timpul de încălzire în vederea umectării aliajului de îmbinare
- Viteza de umectare a aliajului de îmbinare
- Timpul de menținere a sursei termice în contact cu piesa de îmbinat și aliajul de îmbinare.
- Presiunea exercitată asupra componentelor în timpul operației de microîmbinare eutectică
- Viteza de răcire a îmbinării.

Temperatura de încălzire a aliajului de îmbinat trebuie să fie cu cel puțin 10-15°C mai mare decât temperatura de topire a aliajului eutectic, pentru a eficientiza procesul de îmbinare. Dacă temperatura utilizată pentru microîmbinarea a două componente umectate este prea mare există riscul ca aliajul de lipit să se scurgă dintre ele și îmbinarea să nu se realizeze corespunzător. Dacă se folosește o temperatură prea mică, apare riscul ca umectarea să nu se facă uniform, aliajul de îmbinare fiind prea vâscos pentru a se întinde pe suprafața materialului de bază.

Timpul de încălzire este parametrul care, ca și temperatura de încălzire, are atât un efect de natură tehnică, cât și unul de natură economică. Un timp de încălzire prea lung poate produce deteriorări ale componentelor de circuit învecinate. Un timp de încălzire prea scurt poate să nu asigure umectarea necesară realizării unei îmbinări continue și de egală rezistență în întregul ei volum. Din punct de vedere economic este de dorit să se aplice o încălzire cât mai scurtă pentru a se reduce consumurile energetice și costurile de manoperă. Pentru a reduce disiparea căldurii în materialele învecinate, mai ales dacă acestea sunt bune conducătoare de căldură se recomandă ca materialele de bază să se așeze pe un suport izolator

Viteza de umectare a aliajului de îmbinare este foarte importantă în procesul de micro îmbinare a componentelor, ea depinzând, în mare măsură, de calitatea contactului dintre sursa termică și componenta de umectat. Viteza de umectare depinde de asemenea de temperatura de topire a aliajului de lipit. Viteza de umectare a componentelor este importantă deoarece aliajul topit se solidifică foarte repede la o temperatură de topire a aliajului care nu este constantă.

Timpul de menținere al sursei termice în contact cu piesa de îmbinat și aliajul de îmbinare trebuie să fie foarte scurt (de ordinul secundelor), deoarece un timp de contact prea mare are ca efect o supraîncălzire (fierbere) a aliajului de lipit și scurgerea acestuia peste suprafața de umectat.

Presiunea - Dacă presiunea dintre componente este prea mică în secțiunea microîmbinării vor apare goluri, sufluri, ceea ce va reduce valoarea secțiunii îmbinării și, implicit, calitatea îmbinării. Dacă presiunea exercitată este prea mare, aliajul topit va fi eliminat dintre componente, ceea ce va afecta, de asemenea, calitatea îmbinării.

Viteza de răcire a aliajului umectat este foarte mare și, de aceea, operația de lipire trebuie executată într-un timp scurt. La procedeul de microîmbinare prin topire cu fascicul Laser, puterea sau intensitatea fasciculului constituie principalele caracteristici ale acestuia.

Intensitatea fasciculului este exprimată în funcție de modul de funcționare al Laserului prin:

Puterea fasciculului exprimată în W sau kW, pentru laseri cu regim continuu de funcționare;

Energia pulsului, pentru laserii cu emisie pulsată.

În aplicațiile termice fasciculul Laser trebuie focalizat prin intermediul unui sistem optic constituit din lentile sau oglinzi, pentru a se realiza concentrarea energiei pe o suprafață foarte mică (spot). Intensitatea fasciculului se poate caracteriza prin densitatea de energie sau prin densitatea de putere. La procedeul de microîmbinare termosonică principalii parametri tehnologici sunt:

- Timpul de activare cu ultrasunete
- Amplitudinea vibrațiilor acustice produse de către capul activ al sonotrodei
- Presiunea de apăsare pe componentele de îmbinat
- Temperatura de preîncălzire a componentelor de îmbinat
- Temperatura maximă obținută în timpul de impact între capul activ și componentele de îmbinat

Timpul de activare cu ultrasunete este un parametru foarte important în cadrul procesului de microîmbinare termosonică. Se măsoară în [ms], și poate influența creșterea sau descreșterea temperaturii maxime obținute în timpul procesului de îmbinare

Amplitudinea vibrațiilor se măsoară în [μm], și reprezintă zona de microvibrații ce se realizează între capul activ de antrenare/microîmbinare și componentele de îmbinat, și datorită

frecvenței amplitudinilor acestea influențează temperatura maximă obținută.

Presiunea de apăsare se masoară în $[N/mm^2]$ și este compusă dintr-o forță necesară de apăsare pe suprafața de contact dintre capul de antrenare și piesele ce se îmbină. Ea influențează temperatura maximă obținută.

Temperatura de preîncălzire se masoară în $[^{\circ}C]$ – este un parametru foarte important la procedeul de microîmbinare termosonică, deoarece influențează foarte mult difuzia dintre componentele ce se îmbină.

Temperatura maximă obținută se masoară în $[^{\circ}C]$ – este un parametru vital pentru microîmbinarea componentelor unor dispozitive electromecanice (MEMS) deoarece peste temperatura de $240 [^{\circ}C]$, elementele polimerice ce compun dispozitivul se topesc.

3.4 Aliaje de îmbinare pentru procesele de microîmbinare eutectică

3.4.1 Caracteristici generale necesare pentru aliajele de adaos eutectice

Procesele de microîmbinare aplicate microdispozitivelor electromecanice sunt supuse unei restricții tehnologice constând în limitarea superioară a temperaturii de încălzire. Restricția este impusă de natura diverselor materiale care se regăsesc în componența microdispozitivelor. Aceste materiale au proprietăți fizico-chimice sensibil diferite între ele, cea mai importantă diferență fiind cea dintre temperaturile de topire ale acestora. În componența unui MEMS se pot regăsi polimeri, metale, ceramice, situație în care temperaturile de topire ale materialelor componentelor se plasează într-un interval foarte larg de temeprturi, de la cca $200^{\circ}C$ până la cca. câteva mii de grade celsius. Din acest motiv, în timpul încălzirii specifice procesului de îmbinare eutectică poate exista pericolul deteriorării unor anumite elemente componente ale MEMS.

Analizând caracteristicile fizice ale principalelor materiale polimerice care se utilizează la confecționarea de microdispozitive MEMS se constată faptul că o temperatură limită maximă utilizabilă în procesele de microîmbinare este de cca. $240^{\circ}C$. Peste această valoare elementele MEMS confecționate din diverși polimeri își pierd stabilitatea geometrico-dimensională, ele intrând în starea fluid-vâscoasă. În plus, eventualele creșteri ale temperaturii de îmbinare vor conduce la tensionări și deformări ale elementelor MEMS, fenomen nedorit datorită riscului de scoatere din uz a componentelor care au suferit astfel de deformații. Din acest motiv, materialele de adaos utilizabile la realizarea de microîmbinări eutectice vor trebui să aibă temperaturi de topire inferioare valorii de $240^{\circ}C$.

3.4.1.1 Condiții de acceptare a potențialelor aliaje pentru microîmbinare eutectică

Materialele de adaos pentru microîmbinarea eutectică trebuie să îndeplinească următoarele condiții definite pe baza unei experiențe de peste 20 ani a producătorilor de circuite microelectronice:

- Temperatură de topire similară temperaturilor de topire ale aliajelor de lipire din clasa staniu-plumb și în special a aliajului 63Sn-37Pb
- Domeniu de plasticitate îngust
- Capacitate de umectare ridicată vis-a-vis de materialele metalice / placate cu metale utilizate în industria electronică

- Caracteristici mecanice superioare sau cel puțin egale cu cele ale aliajelor de lipire din clasa staniu-plumb
- O bună rezistență la oboseală
- Compatibilitate cu sistemele de fluxuri de lipire existente pe piață
- Stabilitatea în timp a proprietăților și caracteristicilor
- Capacitatea de a fi prelucrat în formele de livrare uzuale: sârme, bare, bandă, sfere, pulbere
- Caracter netoxic
- Preț de cost relativ scăzut.

3.4.1.2 Elemente alternative plumbului pentru realizarea de aliaje de microîmbinare

În decursul timpului a apărut necesitatea eliminării aliajelor de lipire pe bază de plumb. În urma acestui demers au fost dezvoltate, în special, sisteme de aliaje de lipire fără plumb având ca principal constituent staniul, fapt datorat numărului relativ mare de eutectici pe bază de staniu caracterizați prin temperaturi de topire scăzute[59].

Pe lângă staniu aliajele de lipit cu temperatura de topire redusă conțin, de regulă, bismut, cadmiu, indiu, zinc, aur, cupru, stibiu și argint. Din punct de vedere al temperaturii de topire aceste aliaje au temperaturi de topire comparabile cu temperatura de topire a aliajului SnPb37 care este 183°C[5].

Dintre aceste aliaje de lipire se menționează următoarele:

- Aliajele de staniu-indiu (SnIn52, $T_{top} = 118^{\circ}\text{C}$) au temperatură de topire mai mică decât cea a aliajului staniu-plumb, utilizarea lor este însă limitată datorită prețului ridicat
- Aliajele de staniu-bismut (Sn Bi58, $T_{top} = 138^{\circ}\text{C}$), - au, de asemenea, temperatura de topire mai mică decât cea a aliajului staniu-plumb; ele pot opera la temperaturi mai scăzute prezentând faze care se topesc la temperatura de 96°C;
- Aliajele de staniu-zinc (Sn Zn9, $T_{top} = 199^{\circ}\text{C}$) se remarcă printr-o temperatură de topire comparabilă cu cea a aliajului staniu-plumb; ele oferă însă o rezistență la coroziune redusă, ceea ce le limitează utilizarea.
- Aliajele de staniu cu argint și/sau cupru, (Sn Ag3.8 Cu 0.7, $T_{top} = 217^{\circ}\text{C}$; Sn Ag3.5 $T_{top} = 221^{\circ}\text{C}$; Sn Cu0.7, $T_{top} = 227^{\circ}\text{C}$) au temperatura de topire mai mare decât cea a aliajului staniu-plumb, dar se remarcă prin rezistența la coroziune, conductibilitate electrică și termică superioare aliajelelor de staniu-plumb.

3.4.2 Sisteme eutectice metalice utilizabile în procesele de microîmbinare eutectică

3.4.2.1 Sistemul de aliaje aur-siliciu

Cel mai uzual sistem binar formator de aliaj eutectic, utilizat la fabricarea microdispozitivelor MEMS, este sistemul aur-siliciu [29]. Acesta formează eutecticul cu compoziția masică 97.1%Au-2.85%Si (adică 18,6% Si, procentual), eutectic care se formează la temperatura de 663°C. Ca atare, acest sistem se poate utiliza doar dacă nu există polimeri în imediata vecinătate a îmbinării.

3.4.2.2 Sistemul de aliaje aur-stibiu

Aliajele aur-stibiu, prezintă o temperatură de topire asemănătoare temperaturii de topire a eutecticului Au₈₂-Si₁₈. Dat fiind faptul că temperatura de topire este mai mică decât 400°C, se consideră că este posibilă utilizarea acestui eutectic pentru realizarea de microîmbinări în cazul componentelor MEMS. Datorită temperaturilor de topire sensibil diferite ale celor două elemente ale aliajului, o creștere a concentrației de stibiu peste valoarea eutecticului nu modifică sensibil temperatura de topire a noului aliaj.

3.4.2.3 Sistemul de aliaje aur-indiu

Aliajele aur-indiu formează un sistem binar complex, caracterizat prin diverse tipuri de reacții, printre care și 3 reacții eutectice. La aceste aliaje temperatura de topire este mărită datorită prezenței aurului în structură, element care are o temperatură de topire sensibil mai mare decât temperaturile uzuale de prelucrare a componentelor MEMS. Cei trei eutectici au temperaturile de topire în jurul valorii de 450°C, fapt care nu permite utilizarea lor la îmbinarea eutectică a componentelor MEMS. În plus, există posibilitatea formării unor compuși intermetalici de tipul Au₅In₃, Au₇In₃ și AuIn.

3.4.2.4 Sistemul de aliaje aur-bismut

Sistemul aur-bismut cunoaște o reacție eutectică la o concentrație de aproximativ 87% aur, eutecticul respectiv având o temperatură de topire de 241,1°C, comparativ cu bismutul care are temperatura de topire 271,4°C.

Datorită temperaturii scăzute de topire eutecticul acestui sistem se poate utiliza în aplicații de îmbinare eutectică a componentelor MEMS.

3.4.2.5 Sistemul de aliaje staniu-argint

Dezvoltarea acestui aliaj s-a făcut pornind de la aliajul ternar staniu-argint-cupru, relativ des utilizat datorită temperaturilor de topire mai mici de 220°C, dar care formează, la diverse temperaturi în timpul solidificării aliajului de îmbinare, în structura îmbinării, compuși intermetalici binari sau ternari care fragilizează metalul îmbinării. La temperatura de 221°C sistemul de aliaje staniu-argint [8], cunoaște formarea unui eutectic compus dintr-o matrice de staniu și un compus intermetalic de forma Ag₃Sn. Eutecticul este situat în punctul Sn_{96,5}-Ag_{3,5} și are temperatura de topire relativ scăzută: 221°C, fapt care permite utilizarea acestuia pe post de aliaj de îmbinare eutectică la îmbinarea argintului și/sau cuprului.

3.4.2.6 Sistemul de aliaje staniu-argint-cupru (SAC)

Analizând diagrama de faze a aliajului ternar staniu-argint-cupru (figura 3.12) se observă faptul că există un eutectic ternar având compoziția: Sn_{95,5}-Ag_{3,8}-Cu_{0,7} [96], [106]. Temperatura de topire a acestui aliaj eutectic este 217°C, deci aliajul este utilizabil la microîmbinări ale MEMS.

Pe lângă acest eutectic mai există posibilitatea formării altor trei eutectici binari. O reacție între argint și staniu formează o structură eutectică cu matrice de staniu în care se dezvoltă compusul intermetalic Ag₃Sn la temperatura de 221°C. Cuprul reacționează cu staniu și formează la 227°C un eutectic tot pe matrice de staniu cu un compus intermetalic, Cu₆Sn₅. Argintul poate reacționa la rândul lui cu cuprul

formând astfel la temperatura de 779°C o structură eutectică bogată în argint în care se regăsește și o fază bogată în cupru.

Acest aliaj poate fi utilizat pentru îmbinarea eutectică a elementelor MEMS confecționate din argint sau cupru. Aliajul de lipire având o temperatură de topire mult mai mică decât temperaturile de topire ale celor două elemente (Cu-1083°C și Ag-961.78°C), acestea din urmă nu se topesc, schimbul de elemente între materialul de bază și aliajul de îmbinare făcându-se numai prin difuzie. Difuzia este, însă, relativ redusă ca intensitate datorită temperaturii scăzute de operare.

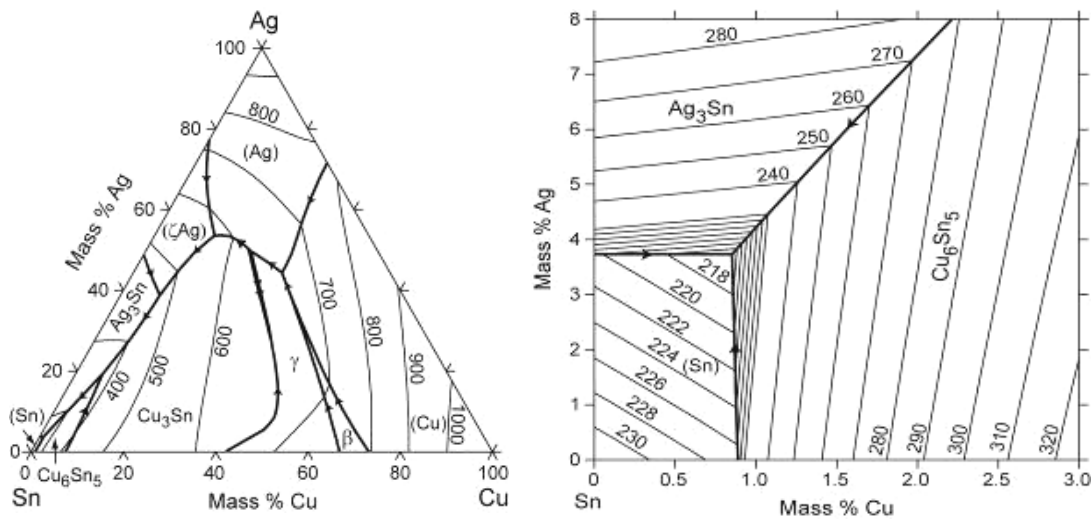


Figura 3.12 Diagrama ternară Sn-Ag-Cu

În acest caz, compoziția chimică a aliajului de îmbinare la interfața cu materialul de bază va varia relativ puțin, menținându-se astfel într-o zonă restrânsă din jurul aliajului eutectic. Urmărind creșterea concentrației de cupru pe diagrama ternară se observă faptul că aceasta produce o creștere relativ mică a temperaturii de topire. Aceasta nu va depăși temperatura critică stabilită inițial la 240°C. Atât la îmbinarea elementelor din argint, cât și la îmbinarea elementelor din cupru creșterea temperaturii de topire a aliajului la interfața metal de bază-aliaj de îmbinare nu va conduce la o depășire a limitei critice de 240°C, deci, poate fi acceptată.

3.4.2.7 Sistemul de aliaje staniu-cupru

Analizând diagrama de echilibru a sistemului staniu-cupru [81] se observă că sistemul este predispus la formarea unui număr relativ mare de compuși chimici și intermetalici. Acest fapt ridică riscurile de fragilizare a aliajului de îmbinare. În cazul realizării îmbinării la o temperatură sub valoarea temperaturii critice (238°C) singurii compuși intermetalici care se pot forma sunt Cu_6Sn_5 și Cu_3Sn .

Un aliaj relativ des utilizat din acest sistem este aliajul Sn99,3-Cu0,7 care se remarcă prin prețul său scăzut,[81]. Sub aspect economic, aliajul Sn99,3-Cu0,7 este preferat altor aliaje ca, de exemplu, aliaje staniu-argint-cupru(SAC) sau aliajului Sn96,5-Ag3,5. Dezavantajul său constă în temperatura de topire mai mare cu aproximativ 10°C decât cea a aliajelor staniu-argint-cupru (SAC). Deși diferența dintre temperaturile de topire nu pare semnificativă, totuși ținând cont că pentru a

se asigura o topire eficientă a aliajului în timpul procesului de îmbinare trebuie să se intervină cu o sursă termică având o temperatură superioară celei de topire, riscul să se depășească limita critică de încălzire este mai mare în cazul aliajului Sn99,3-Cu0,7.

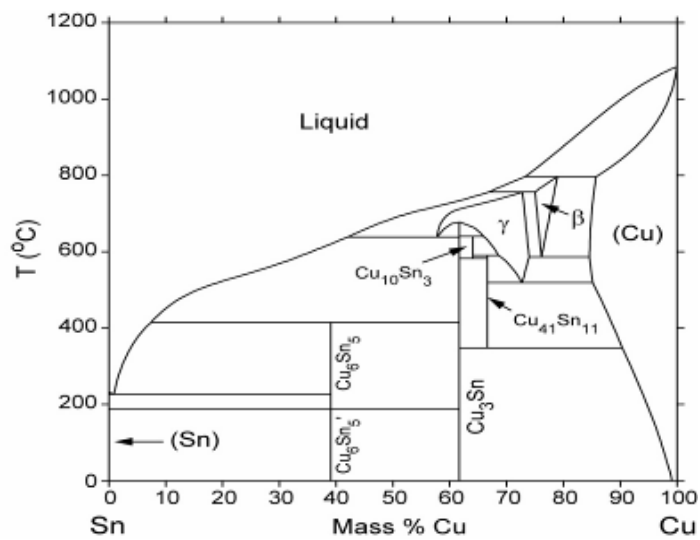


Figura 3.13 Diagrama de echilibru Sn-Cu

4. Microîmbinarea prin topire cu fascicul Laser

4.1 Fasciculul Laser – sursa termică pentru procese de îmbinare și microîmbinare

Laserii sunt surse de radiații electromagnetice care emit în domeniul optic al spectrului (ultraviolet, vizibil, infraroșu)[10]. Emisia acestora este diferită de cea a surselor clasice de radiații. Albert Einstein a fost cel care a fundamentat teoretic efectul Laser, sesizând că în procesele radioactive, pe lângă absorbție și emisie spontană, mai apare și emisia stimulată. Conform legii lui Beer Lambert, intensitatea unei radiații, I_0 , de lungime de undă λ , care traversează un mediu oarecare, de lungime L , scade datorită absorbției de către mediu:

$$I = I_0 \exp(k_\lambda L) \quad (4.1)$$

în care k_λ este coeficientul de absorbție al mediului, funcție de natura mediului și de lungimea de undă a radiației; în situațiile obișnuite, valoarea coeficientului de absorbție este negativ, ceea ce înseamnă că intensitatea radiației după traversarea unui mediu este mai mică decât intensitatea radiației inițiale. Einstein a demonstrat în 1917 că, teoretic, factorul k_λ poate fi și pozitiv, ceea ce ar însemna că radiația ar putea fi amplificată după traversarea mediului. Pentru că un sistem să aibă un coeficient pozitiv de absorbție a radiației, el trebuie să îndeplinească anumite condiții. Dacă radiația cu lungimea de undă λ se produce ca urmare a unei tranziții între două nivele de energie notate cu E_1 și E_2 , cu condiția ca :

$$E_1 < E_2 \quad (4.2)$$

Coeficientul de absorbție va fi definit de: media numărului de electroni aflați pe fiecare nivel (populație electronică): n_1, n_2 , populația nivelului E_1 , respectiv E_2 ; densitatea de radiație $\rho(\lambda)$; timpul de viață al nivelului E_1 ; lungimea de undă, λ ; ponderile celor două nivele.

Coeficientul de absorbție a radiației la trecerea printr-un mediu oarecare, este dat de relația:

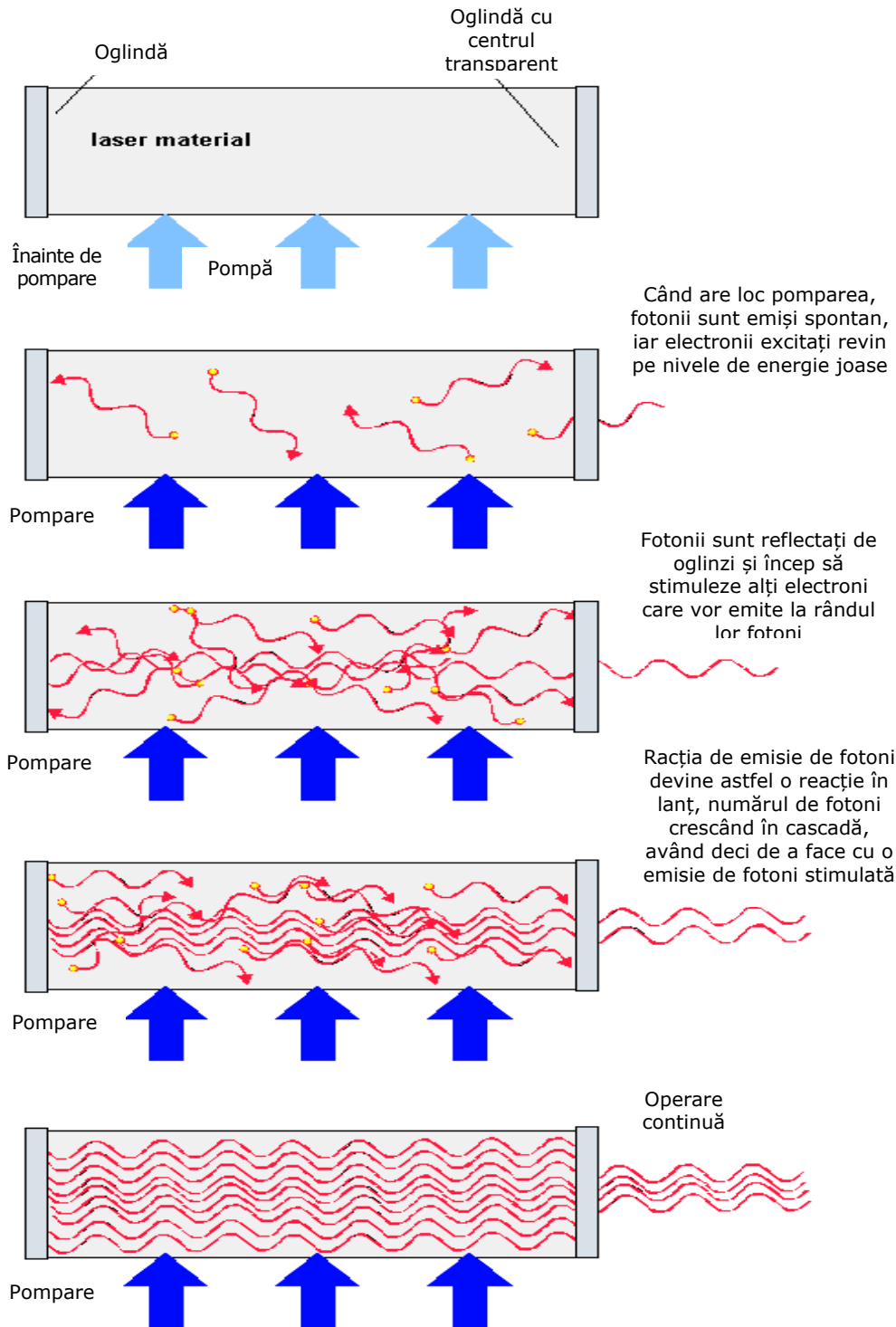
$$k = \text{const}_1 \rho(\lambda) (n_2 - n_1) - \text{const}_2 \frac{n_2}{n_1} \quad (4.3)$$

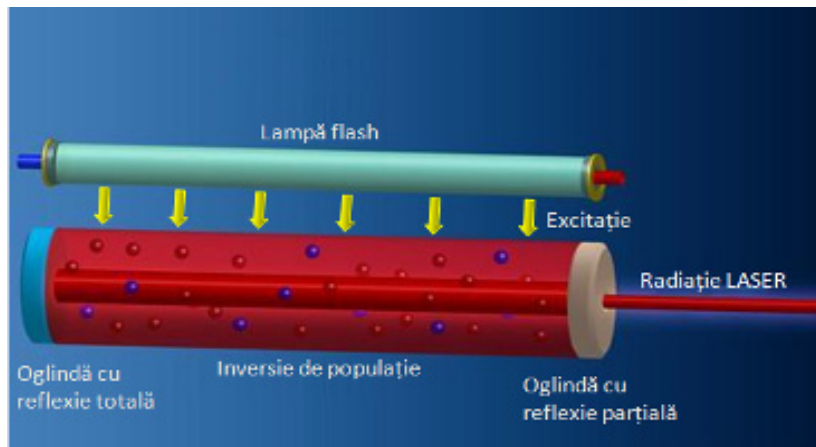
Primul termen poate fi interpretat în funcție de raportul populațiilor celor două nivele energetice considerate: Dacă $n_1 > n_2$, el reprezintă absorbția. Dacă $n_2 > n_1$, el reprezintă emisia stimulată. Cel de-al doilea termen ține seama de emisia spontană și deci nu poate fi decât negativ. Pentru respectarea condiției $k_\lambda > 0$ trebuie ca

$$(n_2 - n_1) > 0 \quad (4.4)$$

Pentru a obține o emisie Laser, sistemul trebuie să se afle într-o stare foarte îndepărtată de echilibrul termodinamic, o stare în care n_2 să fie mai mare decât n_1 . Acest fenomen numit "inversie de populație" se poate realiza numai prin furnizarea unei mari cantități de energie mediului, operație numită "pompare" de energie. O altă condiție necesară pentru obținerea emisiei Laser este ca emisia stimulată trebuie să fie mai mare decât emisia spontană. Principiul funcțional al unui Laser este prezentat în figura 4.1. Pomparea energiei se face de obicei prin descărcare electrică sau radiofrecvență (pentru laserii cu mediu activ gazos CO_2 sau He-Ne), alte metode de pompaj utilizate fiind fascicule luminoase focalizate, pulsatoare, cât și anumite tipuri de reacții chimice.

From Computer Desktop Encyclopedia
 © 2001 The Computer Language Co. Inc.





b.
Figura 4.1 Principiul de funcționare al Laserului. a) Pompare de energie,
b) amplificarea radiației de către mediul activ

Așa după cum s-a arătat anterior, pentru obținerea unei radiații Laser trebuie îndeplinite două condiții esențiale:

- inversarea populației nivelelor energetice prin furnizarea unei mari cantități de energie mediului, deci prin "pomparea de energie în sistem";
 - mărirea densității câmpului de radiație prin folosirea unei cavități rezonante.
- Deși este o radiație electromagnetică, la fel ca și sursele clasice de lumină, radiația Laser are proprietăți spectaculoase, care o diferenciază puternic de acestea: intensitate mare a fluxului electromagnetic, monocromaticitate ridicată și coerență spațială și temporală înaltă.

4.1.1 Monocromaticitatea

Una dintre trăsăturile fundamentale ale radiației Laser o constituie monocromaticitatea, care reprezintă intervalul de lungimi de undă ocupat de radiație, adică lățimea spectrală a emisiei Laser[10]. Gradul de monocromaticitate pentru o linie spectrală de lungime de undă (frecvența), este definit după cum urmează:

$$\mu = \Delta\lambda/\lambda_0 = \Delta\omega/\omega_0 \quad (4.5)$$

unde $\Delta\lambda$ reprezintă lățimea liniei radiației Laser. Practic, laserii sunt considerați ca emițători de radiații monocromatice, datorită faptului că liniile spectrale sunt suficient de înguste pentru a fi descrise ca având o singură frecvență sau o singură lungime de undă. Întrucât radiația laser este de o înaltă monocromaticitate, ea poate fi utilizată în diferite studii, ca frecvență standard. Monocromaticitatea radiației Laser este strâns legată de alte caracteristici importante ale radiației Laser, cum ar fi coerența spațială și temporală.

4.1.2 Coerența

Această proprietate, definitorie pentru radiația Laser, provine din însuși modul de obținere al radiației. Coerența este o corelație între parametrii câmpurilor de radiații produse de către două surse separate spațial, simultan, (Coerența spațială), sau de către aceeași sursă în momente diferite (coerență temporală).

Când sursele sunt coerente, intensitatea I rezultată din suprapunerea câmpurilor într-un punct dat Q , poate avea orice valoare cuprinsă între $\left(\sqrt{I_1^2} + \sqrt{I_2^2}\right)$ și $\left(\sqrt{I_1^2} - \sqrt{I_2^2}\right)$ în funcție de diferența de fază. Când sursele nu sunt coerente, intensitatea I este suma intensităților I_1 și I_2 . Coerența spațială a radiației Laser face ca aceasta să fie puternic direcțională, astfel încât să poată fi focalizată pe suprafețe mici.

4.1.3 Direcționalitatea

Direcționalitatea radiației este descrisă de unghiul solid în care este emisă radiația principală. Dacă unghiul solid este un con, radiația Laser este caracterizată prin unghiul plan al împrăștierii (unghi de divergență). Dacă unghiul solid nu este un con, parametrii definatori sunt cele două unghiuri în planul orizontal și în cel vertical. Pentru cazul prezentat în cea mai mare parte a energiei radiate este concentrată în lobul principal al modelului. Intensitatea maximă a câmpului în cei doi lobi laterali nu depășește 2% din intensitatea maximă I_0 a câmpului de radiație. Presupunând că amplitudinea și faza sunt uniforme în secțiunea transversală a fluxului de radiație, atunci divergența limitată de difracție a fasciculului este unghiul (la jumătatea nivelului de putere):

$$\theta_{0,5} = 1,22\lambda/D \quad (4.6)$$

unde D este diametrul fasciculului.

4.1.4 Puterea, energia și focalizarea fasciculului Laser

Pentru laserii folosiți în aplicațiile termice, puterea sau intensitatea fasciculului constituie principalele caracteristici ale acestuia. Intensitatea fasciculului este exprimată în funcție de modul de funcționare al Laserului prin P - puterea fasciculului exprimată în W sau kW , pentru laserii cu regim continuu de funcționare sau prin E - energia pulsului, pentru laserii cu emisie pulsată. În aplicațiile termice fasciculul Laser trebuie focalizat prin intermediul unui sistem optic constituit din lentile sau oglinzi, pentru a se realiza concentrarea energiei pe o suprafață foarte mică (spot). Intensitatea fasciculului se poate caracteriza prin densitatea de energie sau prin densitatea de putere.

4.1.5 Strălucirea

Strălucirea sau radianța unei surse luminoase poate fi definită ca puterea emisă/unitatea de arie, în unitatea de unghi solid, măsurată în $W/m^2/ster$ radian. Aceasta este o mărime ce caracterizează sursa; prin focalizarea radiației, unghiul solid va fi mai mare, deci strălucirea va fi mai constantă. Laserul este o sursa de radiații electromagnetice puternic colimată, adică cu o mare direcționalitate, ceea ce face ca strălucirea sa să fie mult superioară surselor clasice.

4.1.6 Polarizarea

Aceasta este proprietatea ce exprimă modul de repartizare a oscilației electromagnetice transversale de-a lungul fasciculului. Această proprietate nu

afectează proprietățile de focalizare și concentrare ale sursei, proprietăți de interes în cazul aplicațiilor industriale ale laserilor de mare putere.

4.2 Clasificare Laseri

Laserii sunt numiți și categorisiți în funcție de materialul optic activ utilizat; astfel pot fi laseri cu gaz, cu solid sau cu lichid[50]. Laserii mai pot fi categorisiți în funcție de modul în care operează laserul; mod continuu sau cu impulsuri. Laserii ce emit radiații pentru o perioadă ce depășește 0,25 s se numesc laseri cu undă continuă. Laserii ce emit radiații la un interval regulat, durata fiind de la câteva femtosecunde până la 0,25s sunt laseri cu impulsuri.

4.2.1 Laseri solizi

Materialele laserilor solizi au în comun faptul că materialul de bază cristalin este îmbogățit cu ioni ce asigură un nivel de energie specific. Încorporați în materialul de bază, acești ioni formează mediul activ. Orbitale lor nu participă la legăturile chimice. Materialul de bază (cristal sau sticlă) are așadar o mică influență asupra proprietăților ionilor. Laserii solizi se diferențiază în funcție de tipul și forma materialului de bază și de elementele de îmbogățire[50].

Exemple de materiale de bază

- sticlă (în formă de vergele sau fibre laser)
 - avantaje: simple de produs chiar și la mari dimensiuni
 - dezavantaje: conductivitate termică scăzută, putere scăzută
- Al_2O_3 (corundum, safir; de ex. laser cu rubin, cu titan: laser cu safir)
 - avantaje: conductivitate termică ridicată, putere mare
 - dezavantaje: absorbție relativ ridicată; scump
- YAG (laser yttriu aluminiu granat) îmbogățit cu Nd, Er, Yb
 - avantaje: conductivitate termică ridicată, putere mare, absorbție scăzută
 - dezavantaje: scump
- Yttrium vanadate (YVO_4), îmbogățit cu Nd

Ca și materiale de îmbogățire se folosesc: crom, neodiu, ytterbiu, titan, erbiu.

Tipuri de medii active: vergele Laser, microcristale Laser, placă Laser, fibră Laser, disc subțire Laser.

4.2.2 Laseri cu semiconductori

În laserii cu semiconductori, mediul activ îl formează zona de difuzie a purtătorilor de sarcină la tranziția p-n în cristalul semiconductorului. Rezonatorul optic poate fi format de capetele cristalului semiconductorului, deoarece indexul de refracție ridicat a cristalului are ca rezultat gradul mare de reflexie[50]. Diodele Laser sunt diode cu pompare directă. Puterea diodelor Laser este între 1W și 10W. Calitatea fasciculului scade cu creșterea puterii. Un număr de diode individuale se asamblează una lângă cealaltă într-un singur chip, numit „bară”. Acestea pot genera o putere mai mare de 50 W dacă se montează un sistem de evacuare a căldurii, cu diodele conectate electric în paralel. Prin cuplarea mai multor bare (fascicul) se pot ajunge la puteri de ordinul kW, dar cu o slabă calitate a fasciculului. Utilizând diverse lungimi de undă și direcții de polarizare, pot fi unite până la 6 fascicule, cu pierderi mici și fără a deteriora calitatea fasciculului. Laserii cu diode, cu lungimea de undă între 800 și 1000 de nm, sunt împreună cu laserii YAG, cei mai utilizați pentru prelucrarea materialelor plastice.

4.2.3 Laseri cu gaz

La laserii cu gaz, mediul activ este gazos. Laserii cu gaz au de obicei pompaj electric prin descărcarea în gaz, care este și mediul activ[50].

Cei mai importanți Laseri cu gaz sunt:

- laserii cu CO₂ cu lungimea de undă de aproximativ 10,6 μm (mediu infraroșu), un Laser important pentru tăiere și marcare
- laserii excimer(exciplex) sunt în domeniul ultraviolet; exemple de laseri exciplex: KrF(248nm), XeF(351-353nm), ArF(193nm), XeCl(308nm), F₂(157nm).

4.3 Microîmbinarea prin topire cu fascicul Laser

Dacă un fascicul Laser atinge suprafața piesei de lucru o parte din acesta se reflectă, iar o altă parte este absorbită[52]. Puterea absorbită este transformată în căldură, acest fenomen producându-se într-un interval de cca. 10^{-12} secunde, adică aproape instantaneu. Absorbția fasciculului în material se face conform legii lui Beer. Lungimea de absorbție a fasciculului în material se definește ca fiind distanța după care intensitatea se reduce cu un factor de 1/e. Raportul între puterea absorbită și puterea incidentă este definit ca factor de cuplaj. El depinde de parametri fizici ca: permitivitatea, rezistivitatea electrică și indicii de refracție, precum și de natura materialului, gradul de finisare al suprafeței, lungimea de undă a fasciculului Laser; temperatura piesei care este dependentă de puterea fasciculului și intensitatea sa[69]. Principalele caracteristici ale microîmbinării prin topire cu fascicul Laser sunt:

- Densitate foarte mare a sursei termice
- Posibilitatea realizării unor îmbinări cu lățime foarte mică
- Influențare termică redusă a materialului procesat, zona influențată termic extrem de îngustă
- Posibilitatea de operare fără utilizarea unui material de adaos
- Precizie mare de prelucrare și ușurința de automatizare a procesului
- Posibilitatea de realizare a unor îmbinări omogene sau eterogene între materiale metalice sau nemetalice
- Posibilitatea dirijării prin oglinzi a fasciculului Laser spre puncte greu accesibile, aflate la distanță mare de sursa Laser;
- Neinfluențarea fasciculului Laser de câmpuri magnetice.

Îmbinarea cu Laser se poate compara sub aspectul performanțelor cu îmbinarea cu fascicul de electroni față de care însă elimină necesitatea efectuării sudării în vid; iar în timpul procesului nu apare o radiație X.

Ca principale limitări ale microîmbinării prin topire cu fascicul Laser se menționează:

- reflectarea unei părți a energiei fasciculului de către materialul de bază;
- randamentul scăzut al generării energiei Laser .

Pentru asigurarea protecției materialului topit față de atmosferă la îmbinare este necesară utilizarea unui gaz de protecție, de obicei, argon sau heliu. Procesul de îmbinare prin topire cu fascicul Laser poate fi realizat în două moduri diferite, în funcție de densitatea de putere a sursei termice:

- Îmbinarea convențională la care încălzirea materialului se produce, în principal, prin conducție termică de la suprafață spre interiorul materialului

- Îmbinarea în „gaură de cheie” (keyhole) în cazul în care, datorită densității de putere foarte mare a fasciculului, se produce o străpungere aproape instantanee a materialului pe întreaga grosime a sa cu crearea unui tub capilar de vapori de material.

Îmbinarea în gaură de cheie necesită o intensitate mare a fascicului la suprafața piesei provocând vaporizarea parțială a metalului și creșterea rapidă a coeficientului de absorbție termică și, ca urmare, a adâncimii de penetrare a fascicului în material. Se formează un orificiu de dimensiuni reduse, asemanator cu o „gaură de cheie”, înconjurat de material topit care asigura formarea cusăturii sudate prin solidificarea ulterioară. Acest proces este comparabil cu sudarea cu plasmă în gaură de cheie. O problemă care poate să apară la îmbinarea prin topire cu fascicul Laser este producerea unor pori în îmbinare. Apariția porilor este favorizată de volumul redus al băii topite și de viteza de răcire mare a acesteia, având ca efect împiedicarea evacuării gazelor din baie. Se recomandă evitarea unor geometrii ale cusăturii care nu permit evacuarea gazelor pe la rădăcina îmbinării[69]

4.3.1 Procesul de microîmbinare cu fascicul Laser

Capacitatea de a procesa o gamă largă de materiale, precum și de a produce structuri tridimensionale cu toleranțe de ordinul micrometrilor califică procesul de microprelucrare cu fascicul Laser pentru utilizarea în domeniul microtehnologiilor. Acest proces este utilizat în industria MEMS, atât pentru îmbinarea elementelor de conexiune electrică, cât și pentru încapsulare figura 4.2 [90]. Microîmbinarea se realizează între cele 3 componente: sticla de acoperire, inelul de etanșare din polimer BCB și substratul din siliciu. Fasciculul Laser este îndreptat către cele 3 componente, pătrunde prin sticla plată și sticla de acoperire, ajunge la inelul de etanșare din polimer, acesta se încălzește, ca și substratul de siliciu. Inelul din polimer trece într-o stare semisolidă, poate interacționa ușor cu cele două componente încălzite și ele, astfel se realizează microîmbinarea dorită de tip „waffer”. Dintre avantajele încălzirii cu fascicul Laser pentru încapsularea micro dispozitivelor MEMS se menționează:

- Temperatura maximă a procesului de încălzire cu fascicul Laser localizat poate fi redusă până la temperatura de topire a aliajului de îmbinare
- Nu sunt afectate componentele de circuit sau componentele MEMS din imediata vecinătate.

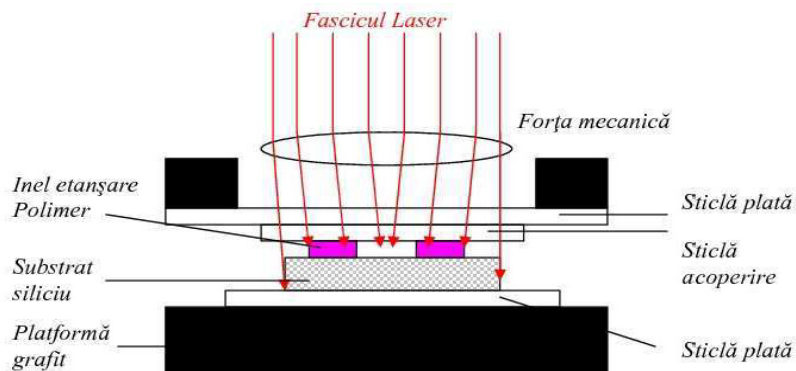


Figura 4.2 Microîmbinarea de tip „waffer” prin încălzire și topire cu fascicul Laser a celor 3 componente

În timp s-au dezvoltat mai multe variante ale procedurii de microîmbinare cu fascicul Laser a componentelor MEMS confecționate din polimeri, materiale metalice sau materiale nemetalice cu scopul de a realiza microasamblarea acestor componente MEMS într-un timp cât mai scurt și la temperaturi cât mai scăzute.

Procesul de îmbinare este derulat în multe situații utilizând măști specifice de ghidare a fasciculului către zona de îmbinare. Acestea asigură posibilitatea unei prelucrări selective a suprafeței, fiind rezistente față de regimul de încălzire și protejând acele zone ale suprafeței care nu trebuie să fie supuse acțiunii fasciculului Laser.

4.3.1.1 Microîmbinarea polimerilor cu fascicul Laser

În cazul microîmbinării cu fascicul Laser a polimerilor se disting două variante tehnologice, în funcție de transparența materialului de bază față de frecvența radiației Laser utilizate:

- Microîmbinarea a doi polimeri opaci
- Microîmbinarea unui polimer transparent cu unul opac

În primul caz, ambele materiale sunt absorbante ale radiației Laser și, ca atare, vor fi încălzite sub acțiunea radiației.

În cel de-a doua caz, materialul de bază transparent se va așeza între fasciculul Laser și materialul opac. Fasciculul va penetra polimerul transparent încălzindu-l relativ puțin și va încălzi preponderent materialul opac, puternic absorbant.

Varianta a doi polimeri transparenți se întâlnește foarte rar în practică. În acest caz, este necesară utilizarea unei puteri superioare a fasciculului Laser față de cazul celor utilizate pentru variantele precedente. În figura 4.3 se prezintă derularea secvențelor procesului de microîmbinare prin topire cu fascicul Laser a polimerilor în varianta polimer transparent – polimer opac, [89]. În secvența A fasciculul Laser penetrează componenta transparentă aflată în poziție superioară și este absorbit de componenta opacă care se topește la suprafață.

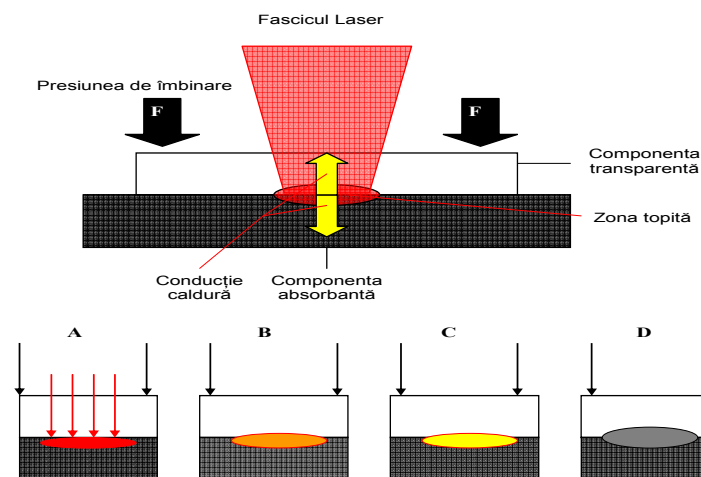


Figura 4.3 Procesul microîmbinării prin topire cu fascicul Laser a polimerilor

Materialul topit al componentei opace încălzește în secvența B componenta transparentă, aceasta din urmă topindu-se superficial. Se formează o baie topită de material plastic provenit de la ambele straturi - secvența C. La răcirea materialului baia de metal topit se solidifică creând microîmbinarea - secvența D.

Pentru procesele de microîmbinare cu Laser se utilizează în mod uzual surse Laser în stare solidă de tip Nd: YAG și Lasere tip diodă.

4.3.1.2 Microîmbinarea cu mască a polimerilor

În unele cazuri este necesară încălzirea materialului doar în anumite zone. În acest caz, între fasciculul Laser și componentele de îmbinat se poate interpune o „mască”, figura 4.4, [85]. Fasciculul Laser poate să treacă prin orificiile măștii și să atingă componentele de îmbinat realizând prelucrarea termică (îmbinarea), dar nu atinge suprafața componentelor în zonele acoperite de mască, zone ale piesei care trebuie protejate. Utilizarea unei măști face posibilă microîmbinarea unor structuri extrem de fine (de ordinul a 50-100 μm), îmbinarea putând fi realizată în diferite moduri sub aspectul formei și dimensiunii zonelor îmbinate. Îmbinări liniare sau curbe de diferite lățimi pot fi produse printr-o singură operațiune. Îmbinarea cu mască este folosită, în principal, pentru realizarea unor senzori, cipuri și a altor componente electronice.

Această tehnică este favorabilă, în special, în aplicațiile care prelucrează componente ce conțin canale pentru transmiterea de lichide sau gaze.

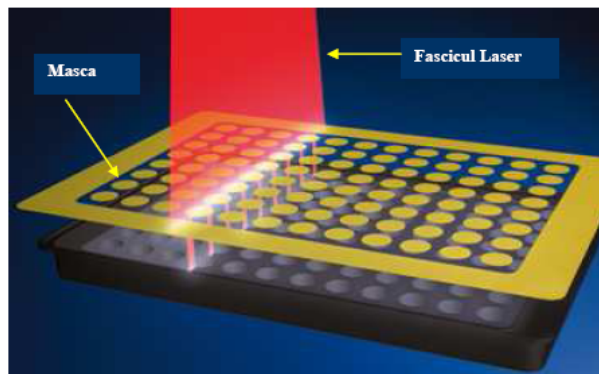


Figura 4.4 Mască pentru microîmbinarea cu fascicul Laser

Din aceste motive, masca de microîmbinare cu Laser este frecvent utilizată în industria medicală pentru asamblarea dispozitivelor micro-fluidice. În figura 4.5 este prezentat principiul de microîmbinare cu mască cu fascicul Laser liniar a unui polimer transparent cu un polimer absorbant, [68] și principiul de îmbinare cu fascicul Laser tip vector.

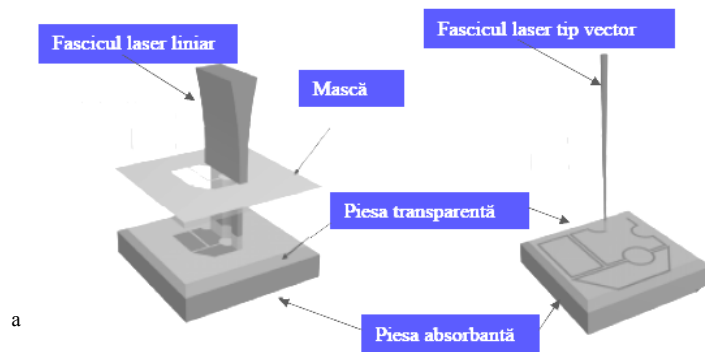


Figura 4.5 Microîmbinarea cu mască cu fascicul Laser liniar(a), cu fascicul Laser tip vector(b)

5. Microîmbinare termosonică

5.1 Procesul de microîmbinare termosonică – Generalități

Microîmbinarea termosonică constă dintr-o combinație între procedeul de îmbinare cu ultrasunete și procedeul de îmbinare prin termo-compresiune, combinație care exploatează caracteristicile pozitive ale fiecăruia dintre cele două procedee în parte.

În prezent, procedeul de microîmbinare termosonică este utilizat predominant pentru realizarea conexiunilor electrice ale microdispozitivelor. Există două variante de microîmbinare prin acest procedeu, figura 5.1, [60]:

- Microîmbinare termosonică cu capete tip bilă
- Microîmbinare termosonică cu capete aplatizate tip pană

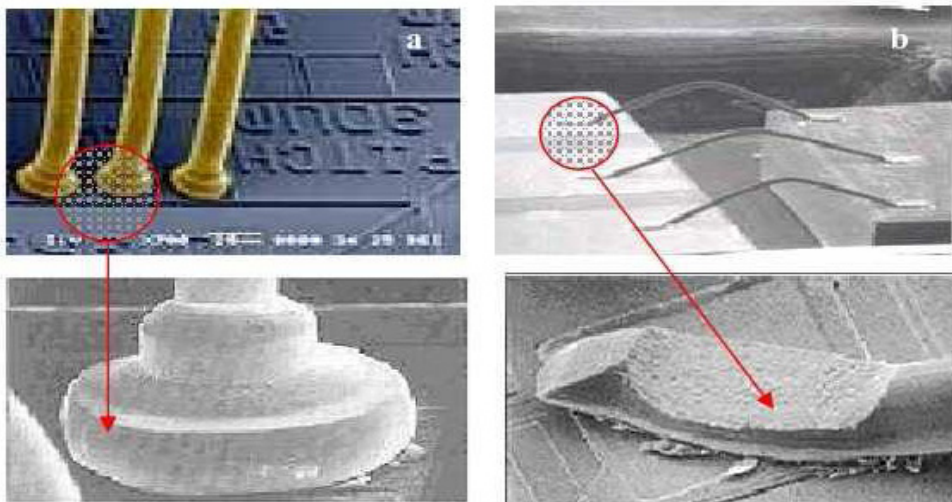


Figura 5.1 Microîmbinări termosonice, conductori monofilari pentru conexiuni electrice
a. tip "bilă", b. tip "pană" [60]

Circa 90% din numărul microîmbinărilor termosonice realizate în industria microprocesoarelor sunt de tip „bilă”, restul de 10% fiind de tip „pană”, [60].

În cazul microîmbinării termosonice temperatura interfeței de îmbinare are, uzual, valori în intervalul 100-150°C, la aceste valori ale temperaturii riscul de deteriorare a componentelor MEMS fiind relativ scăzut. În tabelul 5.1 este prezentată o comparație între îmbinarea prin termocompresie, îmbinarea cu ultrasunete și îmbinarea termosonică sub aspectul temperaturii de operare și al materialelor la care aceste procedee se pot aplica. Dezvoltarea procedeeului de microîmbinare termosonică a apărut ca un rezultat al încercărilor de a îmbunătăți productivitatea procesului de îmbinare cu ultrasunete.

Tabel 5.1 Comparație între îmbinarea prin termocompresie, cu ultrasunete și termosonică

Tip îmbinare	Temperatura	Materiale Conductorii	Material substrat	Observații
Termo compresie	300-500°C	Au	Al, Au	Presiune mare, fără energie ultrasonică
Ultrasonică (wedge bonding)	25°C	Au, Al	Al, Au	Presiune mică, cu energie ultrasonică
Termosonică (ball-bonding,)	100-240°C	Au, Cu	Al, Au	Presiune mică, cu energie ultrasonică

Pentru a mări viteza de realizare a microîmbinării cu ultrasunete fără riscul de a distruge eventualele componente învecinate este favorabilă o intervenție termică suplimentară care să îmbunătățească condițiile în care se derulează procesul de microîmbinare. Această energie suplimentară poate fi asigurată printr-o încălzire a componentelor, ceea ce a condus, în fapt, la dezvoltarea îmbinării termosonice.

Microîmbinarea termosonică a materialelor metalice neferoase, în varianta tip bilă „ball-bonding” reprezintă, în prezent, cea mai utilizată tehnologie de microîmbinare a conductorilor monofilari din industria componentelor electronice. Procedul asigură o viteză mare de operare de până la 10 microîmbinări / secundă, [61]. În același timp, utilizarea îmbinării termosonice asigură versatilitate și flexibilitate înaltă; sistem de programare adaptabil; rată de defectare mică și posibilitatea de adaptare rapidă la materiale și tehnologii noi. Apare însă o problemă datorită lungimii relativ mari a interconexiunilor care poate conduce la o diminuare a performanțelor electrice a sistemului.

Ca surse termice suplimentare la microîmbinarea termosonică se pot utiliza un fascicul Laser, un jet de aer cald sau o lampă de încălzire cu radiații infraroșii IR. Sursa termică suplimentară asigură o preîncălzire a materialului înainte de acțiunea sursei principale (ultrasunetele). Preîncălzirea modifică alura câmpului termic la îmbinare, așa cum se arată principal în figura 5.2

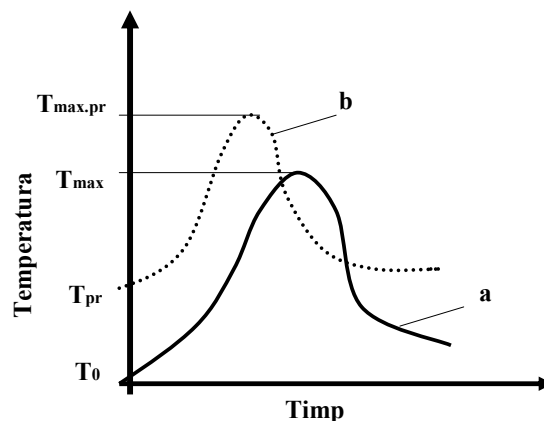


Figura 5.2 Ciclul termic la microîmbinare: fără preîncălzire (a), cu preîncălzire (b)

Scăderea vitezei de răcire în cazul preîncălzirii face ca modificările structurale din zona influențată termic să fie mai lente, deci mai apropiate de echilibru. Ca urmare, structurile fragile din această zonă sunt mai diminuate cantitativ, zona influențată termic va avea duritate mai mică și o tendință de fisurare mai redusă. În același timp, prin preîncălzire se asigură uniformizarea relativă a câmpului termic după procesul de microîmbinare termosonică, ceea ce are ca efect micșorarea tensiunilor remanente și a deformațiilor din microîmbinare cu asigurarea condițiilor de precizie dimensională înaltă a structurii.

Creșterea temperaturii maxime în microîmbinare poate însă conduce la o mărire a grăunților cristalini în regiunea supraîncălzită a zonei influențate termic; această tendință fiind însă oarecum frânată de creșterea vitezei de încălzire.

În același timp, productivitatea operației de îmbinare scade ca urmare a preîncălzirii, iar consumurile energetice și, ca urmare, costul operației de microîmbinare se măresc.

Din considerentele de mai sus, rezultă că este necesară alegerea unei valori cât mai reduse pentru temperatura de preîncălzire, ceea ce impune o optimizare a regimului tehnologic de îmbinare. În practică, încălzirea suplimentară se realizează, de cele mai multe ori cu jet de aer cald sau cu radiații infraroșii. În figura 5.3 este prezentat procedeul de microîmbinare termosonică cu sursă suplimentară de căldură produsă de o termosuflantă cu jet de aer cald.



Figura 5.3 Microîmbinare termosonică utilizând ca sursă suplimentară de căldură un jet de aer cald

Utilizarea jetului de aer cald are ca efect și o curățire a suprafețelor microîmbinării prin arderea și eliminarea diferiților oxizi, grăsimi, umezeală ce se află pe suprafețele de contact ale componentelor.

În cazul utilizării radiației infraroșii pentru încălzirea suplimentară se preferă folosirea lămpilor cu halogen care se remarcă prin putere și randament ridicate, precizie de direcționare a încălzirii și fiabilitate mare.

Indiferent de modul de preîncălzire, căldura înmagazinată de către componente trebuie să fie menținută constant pe durata operației de microîmbinare propriuzisă (termosonică). Pentru aceasta, suprafața pe care se așează componentele trebuie să fie acoperită cu un material izolator.

5.2 Variante ale microîmbinării termosonice

5.2.1 Microîmbinarea termosonică tip „bilă” a firelor

Principala aplicație a procedurii de microîmbinare termosonică în varianta tip „ bilă” este îmbinarea firelor pe diverse substraturi pentru asigurarea unor conexiuni electrice, figura 5.4, [62],[97]. Ca materiale de bază pentru microîmbinare se folosesc fire subțiri din aur, argint, cupru și aluminiu cu grosimi cuprinse între 50-500 μm care se îmbină termosonic cu un substrat de cupru, aluminiu, siliciu cu grosimi cuprinse între 100- 500 μm .

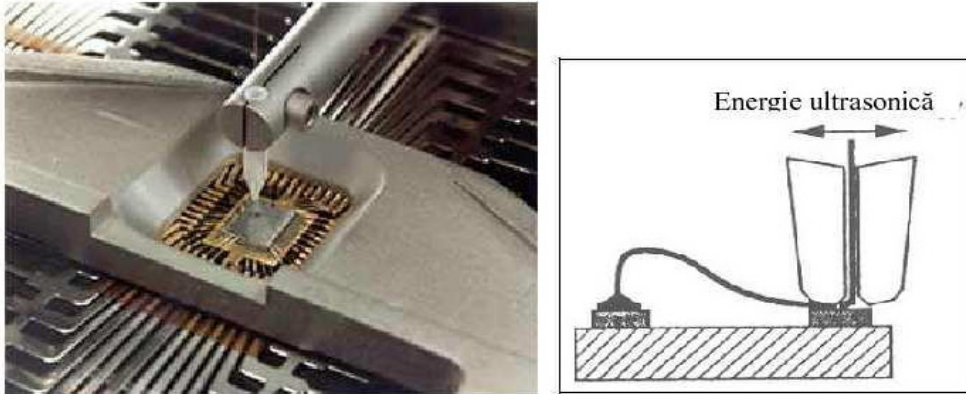


Figura 5.4 Procesul de microîmbinare termosonică de tip „bilă”

În figura 5.5 se prezintă etapele procesului de microîmbinare termosonică, [60]. Procesul începe cu amorsarea unui arc electric între fir și suport. Acesta topește extremitatea conductorului monofilar pe o anumită lungime, astfel încât să se asigure producerea unei sfere de material topit cu un diametru dat [cca. $(2,5-3) \times$ diametrul conductorului monofilar], [46]. Materialul topit este absorbit prin efectul de capilaritate înspre interiorul camerei din extremitatea dispozitivului de îmbinare, figura 5.5 a.

În faza a doua, capul de îmbinare coboară la nivelul suprafeței substratului și apasă cu o forță tehnologică declanșându-se ciclul ultrasonic. Ca efect, se realizează conexiunea tip „bilă” dintre conductorul monofilar și substratul din material neferos, figura 5.5 b. Îmbinarea se realizează cu o forță de apăsare mai mică de 100g, la temperatura de cca. 150 $^{\circ}\text{C}$, cu activare ultrasonică la frecvențe cuprinse între 60 și 120 kHz.

În faza a treia, capul de îmbinare se ridică și se poziționează pe coordonatele de îmbinare a următoarei conexiuni, figura 5.5 c.

În faza a patra se sudează cu ultrasunete cea de a doua conexiune de tip „pană”, realizându-se și debitarea conductorului monofilar, figura 5.5 d.

Procesul se încheie prin retragerea capului de îmbinare la o cotă tehnologică, simultan cu extragerea din acesta a conductorului monofilar la o lungime necesară pentru următorul ciclu de îmbinare, figura 5.5 e și f.

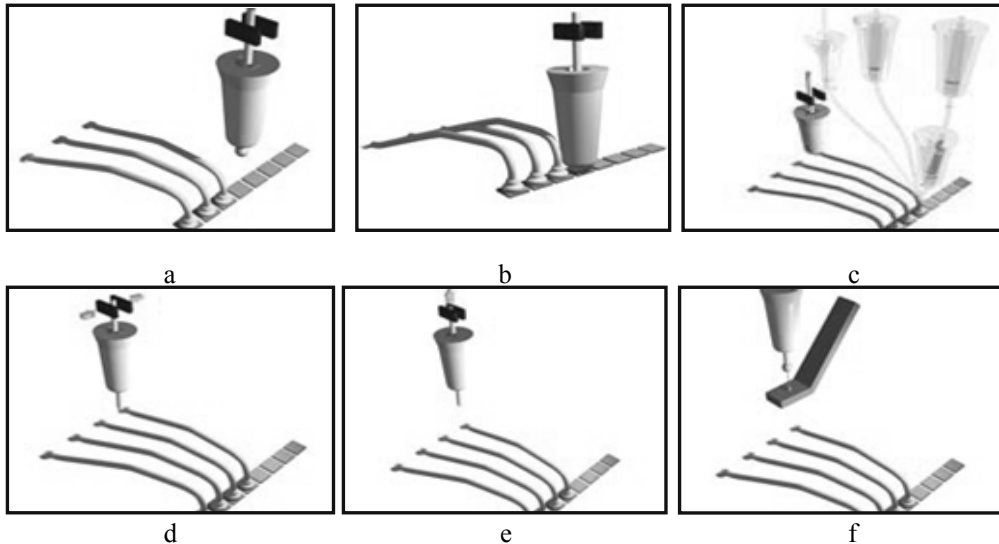


Figura 5.5 Etapele operațiilor de realizare a procedurii de microîmbinare termosonică varianta "bilă"[57]

5.2.2 Microîmbinarea termosonică tip „pană” a firelor

Acest procedeu este prin excelență o tehnică de îmbinare cu ultrasunete, cu aport de căldură dintr-o sursă separată. Îmbinarea se realizează exclusiv prin efectul energiei ultrasonice, la temperatura de 125-150 °C. Activarea ultrasonice are loc la frecvențe de 60 -120 kHz. Materialele uzual îmbinate prin procedeu termosonic tip „pană” sunt: aur, aluminiu, cupru și argint. Inițierea procesului de microîmbinare începe prin apropierea elementului activ de antrenare/dirijare a firului de substrat, firul aplatizându-se sub formă de pană, figura 5.6.[17]

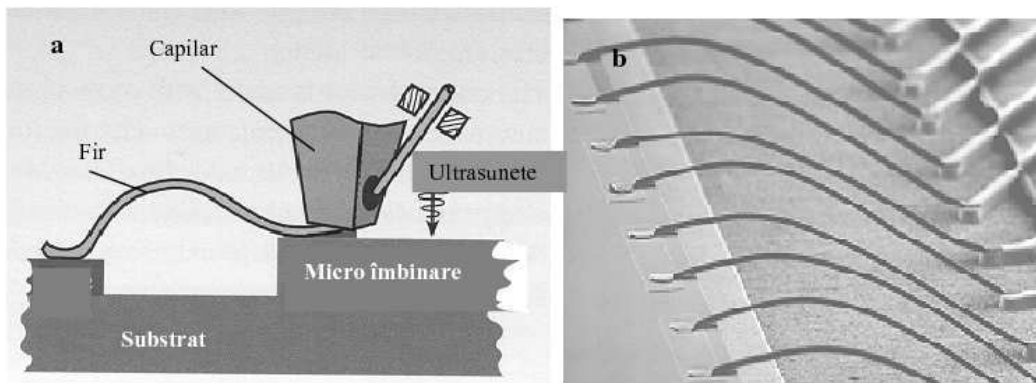


Figura 5.6 Procedeu de microîmbinare termosonică tip "pana"(a), detaliu cu fir îmbinat sub formă de pană (b).

Procesul de microîmbinare este prezentat schematizat în figura 5.7, [60]. Procesul începe cu poziționarea elementului activ de antrenare/îmbinare al firului pe coordonatele suprafeței substratului pentru realizarea primei conexiuni. Cu ajutorul

forței de îmbinare și a ciclului ultrasonic se obține prima conexiune de tipul „pană” și, totodată, se asigură debitarea conductorului monofilar. figura 5.7a.

În faza a doua, capul activ de antrenare/îmbinare al firului se ridică și se poziționează pe coordonatele de îmbinare ale următoarei conexiuni, figura 5.7 b.

În faza a treia capul activ de antrenare/îmbinare a firului coboară pe coordonatele celei de-a doua conexiuni, figura 5.7 c. În faza a patra capul activ de antrenare/îmbinare acționează cu o forță tehnologică necesară și cu un ciclu ultrasonic, realizându-se cea de-a doua conexiune, figura 5.7d. În aceeași secvență se efectuează și debitarea conductorului monofilar.

În fazele cinci și șase, capul activ de antrenare/îmbinare al firului, se ridică și se poziționează pe coordonatele unei noi conexiuni, figura 5.7 e și f, urmând ca un nou ciclu de microîmbinare să înceapă.

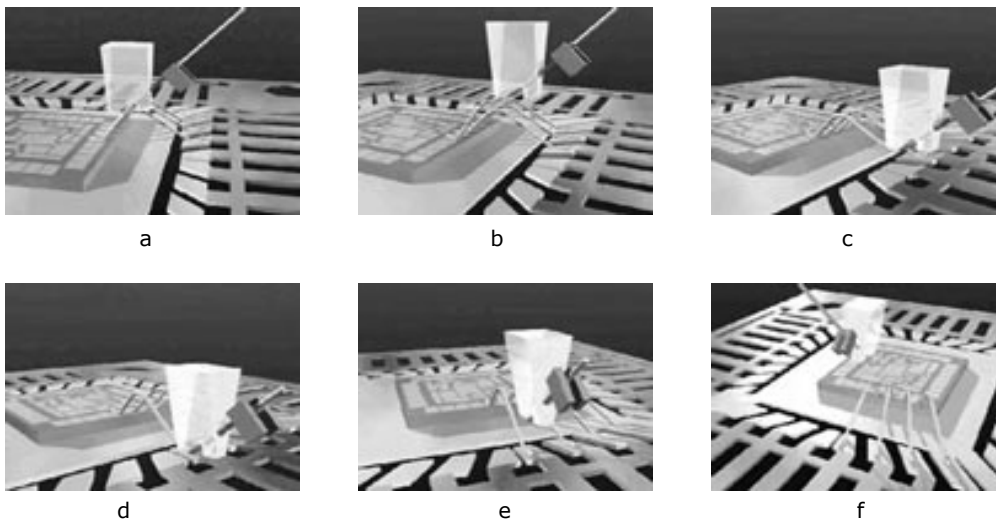


Figura 5.7 Fazele operației de microîmbinare termosonică de tip „pană”[60]

Cadența procesului de microîmbinare termosonică poate ajunge la valori de până la 5 conexiuni îmbinate într-o secundă

5.2.3 Microîmbinarea termosonică a benzilor din materiale neferoase

O serie de elemente pentru conexiuni electrice sau sisteme de fixare ale componentelor MEMS sunt formate din benzi confecționate din aur, aluminiu, cupru, argint (conexiuni) sau cupru (bride de fixare).

Aceste elemente sunt îmbinate, de obicei, prin procedeul termosonic tip pană („wedge – bonding”). În figura 5.8 și figura 5.9 sunt prezentate microîmbinări ale unor benzi din aluminiu pe substrat de aluminiu, respectiv microîmbinări eterogene formate din benzi de aur pe suport substrat din aluminiu realizate cu acest procedeu, [60].

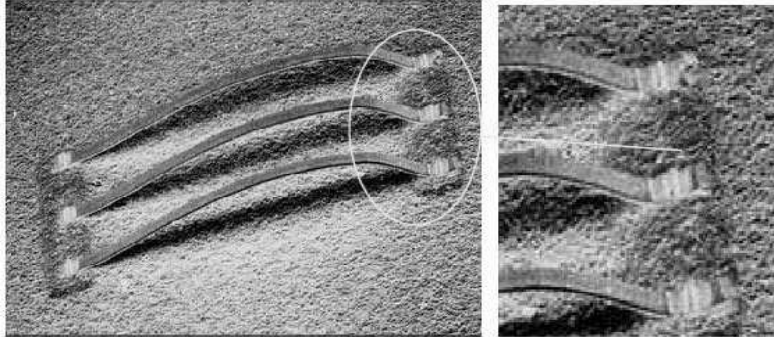


Figura 5.8 Microîmbinare termosonică tip „pană” benzi de aluminiu pe substrat de aluminiu[60]

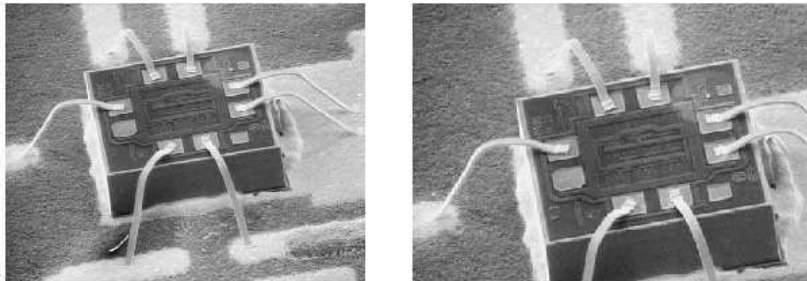


Figura 5.9 Microîmbinare cu ultrasunete benzi aur pe suport substrat de aluminiu

În figura 5.10 se prezintă un dispozitiv specializat(cap activ sonotrodă) de microîmbinare termosonică a unor benzi din aur pe suport de aluminiu [60].

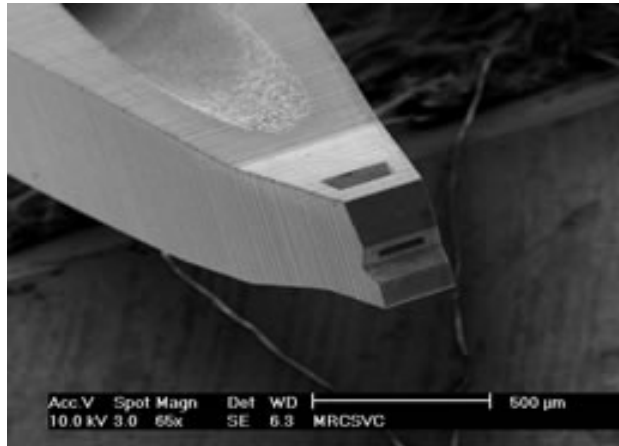


Figura 5.10 Dispozitiv specializat de microîmbinare termosonică benzi aur pe suport de aluminiu

5.2.4 Microîmbinarea termosonică prin suprapunere folosind ca materiale de adaos intermediare bile din aur (Flip Chip)

În dispozitivele MEMS apare necesitatea îmbinării unor plăcuțe din aur pe un substrat din alt material, îmbinarea termosonică prin suprapunere care se realizează, de obicei, utilizând elemente intermediare cu formă de sferă (bile) dintr-un aliaj de îmbinare, plasate între cele două componente.

Utilizarea acestei îmbinări permite în comparație cu alte tipuri de îmbinări simplificarea procesului de prelucrare și a operațiilor de montaj, reducerea nivelului de temperatură la asamblare, a presiunii de încărcare și a timpului de microîmbinare, [1][91].

În figura 5.11 este prezentată principial o microîmbinare prin suprapunere realizată cu ajutorul a două procese de microîmbinare: prin termocompresiune (a), respectiv termosonic (b), [35].

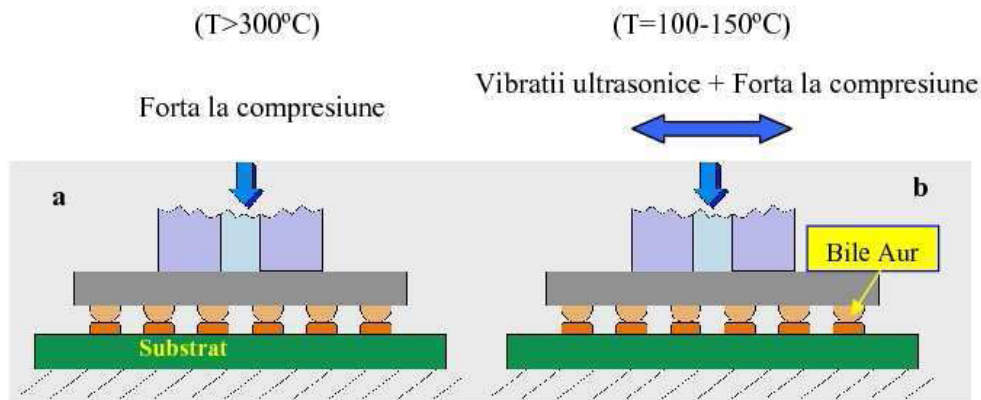


Figura 5.11 Principiul microîmbinării prin suprapunere (Flip-Chip), proces de microîmbinare prin termocompresiune (a) și proces de microîmbinare termosonică (b)

Îmbinarea prin termocompresiune necesită o temperatură la interfață de aproximativ 300°C , temperatură care poate deteriora componentele învecinate încapsulate în material plastic. Diferit de această situație la microîmbinarea termosonică temperatura la interfață este mult mai mică, de obicei între $100-150^{\circ}\text{C}$, ceea ce nu afectează componentele învecinate.

Comparând cele două procedee se constată că tehnologia de microîmbinare termosonică prezintă și următoarele avantaje, [7] :

- timpul de ciclu al procesului poate fi redus de la câteva minute până la mai puțin de 10 secunde
- costul de producție este mai mic pe unitatea de produs.

Materialul de lipire, de regulă aur, poate avea diferite forme (de obicei, bile) și dimensiuni de ordinul $50-80\ \mu\text{m}$. În timpul procesului de încălzire materialul de adaos se înmoaie și se aplatizează producând îmbinarea componentelor.

În figura 5.12 se prezintă o secțiune printr-o îmbinare realizată prin procedeul de microîmbinare termosonică prin suprapunere de materiale (Flip-Chip)[7]. Plăcuța din aur are o formă tronconică cu baza având diametrul de aproximativ $75\ \mu\text{m}$, iar înălțimea de aproximativ $50\ \mu\text{m}$. Presiunea aplicată este de cca $75\ \text{g}$ pe fiecare volum de material de îmbinare (bila). Bila este formată prin topirea capătului unei sârme având diametrul de $25\ \mu\text{m}$.

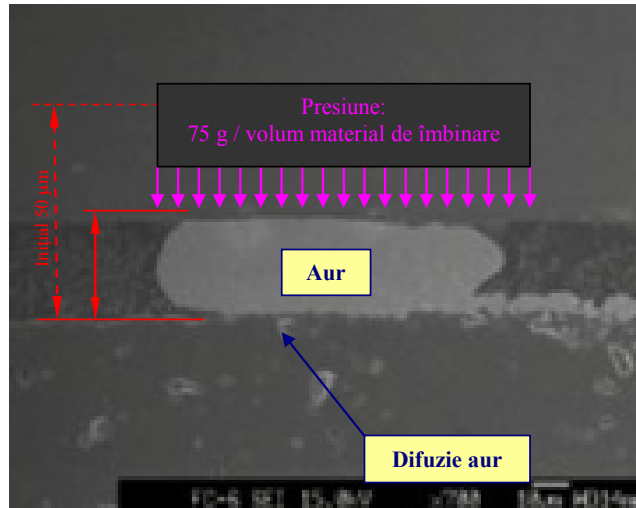


Figura 5.12 Secțiune printr-o îmbinare realizată prin procedeul de microîmbinare termosonică prin suprapunere (Flip chip) [7]

5.2.5 Microîmbinarea termosonică a conexiunilor electrice din aur prin tehnicile tip „bilă”- „pană”

Microîmbinarea conductorilor (uzual din aur) utilizați pentru realizarea conexiunilor electrice a MEMS cu placa de bază este una dintre aplicațiile cel mai des întâlnite în practica fabricației MEMS. Această microîmbinare se execută utilizând ambele variante ale procedurii de îmbinare termosonică: tehnica de microîmbinare tip „bilă” și tehnica de microîmbinare tip „pană”, figura 5.13, [25]. Capul activ de antrenare/îmbinare al firului pentru microîmbinare este fabricat dintr-un material ceramic cu oxid de aluminiu de mare densitate (Al_2O_3), având un diametru de 1,6 mm și o lungime de 11 mm. Prin capul de antrenare este introdus un fir din aur având diametrul de cca 18-33 μ m. Suportul este realizat din aluminiu (de obicei cu 1%Si și 0,5%Cu).

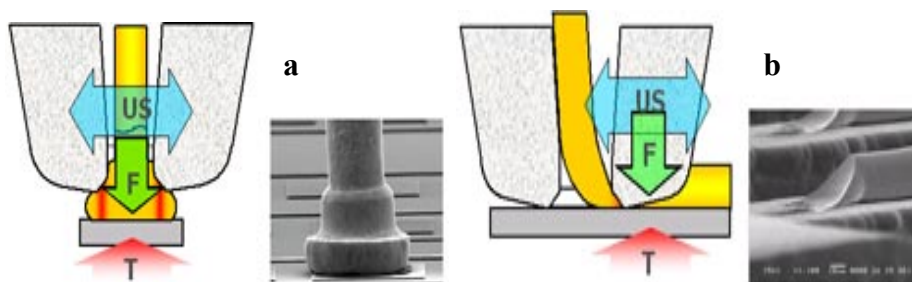


Figura 5.13 Procesul de microîmbinare termosonică a conexiunilor electrice din aur [25] prin tehnicile : „bilă” (a) și „pană”(b)

Etapele microîmbinării termosonice tip „bilă” (*ball bonding*) prezentate în figura 5.14 sunt următoarele, [83]:

1. *Formarea bilei la ieșirea din capul de antrenare.* Procesul de microîmbinare începe cu deschiderea clemei pentru eliberarea sârmei la al cărei capăt trebuie să se formeze bila (figura 5.14 a). Formarea bilei are la bază topirea capătului sârmei cu ajutorul unui arc electric.
2. *Realizarea primei microîmbinări tip „bilă”.* Un dispozitiv de întindere asigură poziționarea bilei în centrul tubului capilar, (figura 5.14 b) și apoi se realizează prima îmbinare prin sudare cu ultrasunete (figura 5.14 c).
3. *Capul de antrenare, se ridică la înălțimea poziției de formare a buclei,* (figura 5.14 d).
4. *Realizarea buclei după prima microîmbinare tip „bilă”.* Odată ce capilarul ajunge în a 2 a poziție de îmbinare, el deformează sârma pe substrat producând o aplatisare a firului sub formă de pană (figura 5.14 e)
5. *Formarea celei de-a doua microîmbinări tip „pană”,* figura 5.14 f.
6. *Ridicarea capului de antrenare și formarea unei „cozi”* (figura 5.14 g).
7. *Decuparea „cozii” microîmbinării* (figura 5.14 h). Capul de antrenare /îmbinare se ridică deasupra plăcuței substrat la înălțimea dorită. În timp ce capul de antrenare își continuă urcarea către poziția prescrisă, se comandă decuparea „cozii”, după care ciclul se repetă.

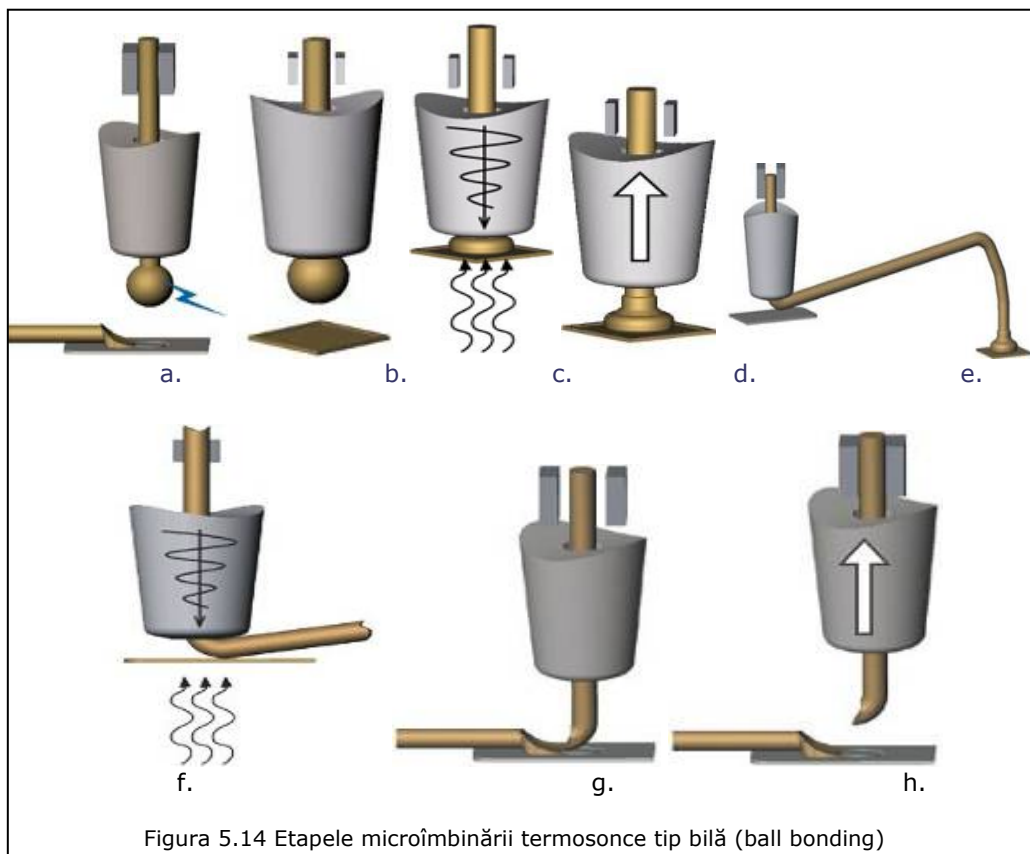


Figura 5.14 Etapele microîmbinării termosonice tip bilă (ball bonding)

Etapele microîmbinării termosonice tip pană (*wedge bonding*), prezentate în figura 5.15, sunt următoarele, [88]:

1. *Coborârea capului de antrenare-îmbinare pe substrat (PAD).* Capul de antrenare - îmbinare este poziționat de către aparat deasupra substratului, în timp ce capătul firului este scos din tubul capilar prin orificiu (figura 5.15 a)
 2. *Formarea primei microîmbinări.* (figura 5.15 b)
 3. *Ridicarea capului de antrenare-îmbinare la poziția de formare a buclei,* (figura 5.15.c)
 4. *Formarea buclei.* În timp ce clema rămâne deschisă, capul de antrenare - îmbinare se deplasează înspre poziția celei de-a 2 a îmbinări, formându-se o buclă (figura 5.15 d)
 5. *Formarea celei de-a doua microîmbinări,* (figura 5.15 e).
 6. *Tăierea firului.* Clemele firului se retrag la sfârșitul celei de-a 2-a îmbinări, trăgând firul și cauzând ruperea acestuia, (figura 5.15 f).
- Microîmbinarea tip pană este realizată prin folosirea a două metode de rupere a firului: ruperea prin tragerea firului prins în cleme, (figura 5.15 g), și metoda de rupere a firului, prin deplasarea nicovalei în plan orizontal (figura 5.15.h)
7. *Microîmbinarea firului următor.* Capul de antrenare - îmbinare se ridică la înălțimea inițială, iar clema împinge sârma prin orificiu. În acest fel se formează o nouă buclă, iar capilarul este pregătit pentru un nou ciclu de îmbinare, (figura 5.15 i).

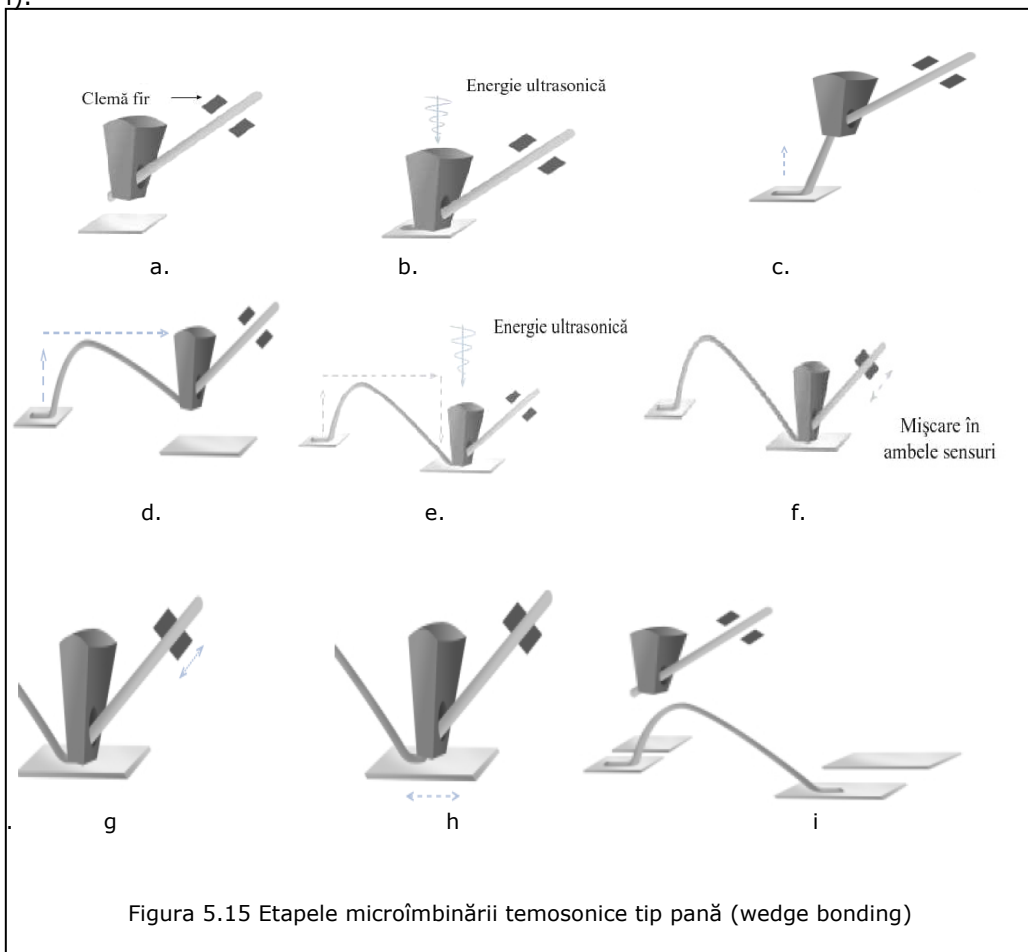


Figura 5.15 Etapele microîmbinării termosonice tip pană (wedge bonding)

5.3 Obiectivele tezei de doctorat

Așa cum s-a menționat, procesele de microîmbinare joacă un rol decisiv în calitatea și eficiența dispozitivelor electronice. Dezvoltarea proceselor de microîmbinare apare ca o strictă necesitate, această preocupare cunoscând în prezent o amploare remarcabilă în țările în care se urmărește creșterea pregnantă a industriei electronice.

Prezenta lucrare se înscrie în această prioritate propunându-și ca **obiectiv principal optimizarea proceselor de microîmbinare specifice fabricației de dispozitive de tip MEMS**. În mod concret, lucrarea își propune:

- Cercetarea procesului de microîmbinare eutectică și evidențierea principalelor influențe ale parametrilor tehnologici ai procesului pentru cazul îmbinărilor tip folie - folie din materiale omogene (cupru) și eterogene (argint-cupru) folosind diferite tipuri de aliaje eutectice ecologice fără plumb.
- Cercetarea procesului de microîmbinare prin topire cu fascicul Laser și evidențierea principalelor influențe ale parametrilor tehnologici ai procesului pentru cazul îmbinărilor tip folie-folie din materiale metalice omogene (aluminiiu sau cupru) și a îmbinărilor tip fir-fir din materiale omogene (cupru), respectiv al îmbinării materialelor polimerice sub formă de folie.
- Cercetarea procesului de microîmbinare termosonică și evidențierea principalelor influențe ale parametrilor tehnologici ai procesului de realizare a îmbinărilor tip folie-folie din materiale omogene (aluminiiu sau cupru) și eterogene (aluminiiu-cupru), folosind ca sursă termică suplimentară un jet cu aer cald, respectiv un fascicul Laser tip diodă.
- Cercetarea posibilității de microîmbinare hibridă prin ultrasunete și fascicul Laser a îmbinărilor tip fir-folie omogene (cupru-cupru) și eterogene (aur-cupru, argint-cupru).

În vederea realizării obiectivelor principale ale tezei a fost necesară definirea unor obiective secundare și anume:

- Conceperea, realizarea și verificarea în funcționare a unui dispozitiv de microîmbinare ce utilizează fasciculul Laser produs de o diodă Laser
- Conceperea, realizarea și verificarea în funcționare a unui dispozitiv pentru microîmbinarea cu Laser a foliilor din polimeri
- Conceperea, realizarea și verificarea unui cap activ modular de microîmbinare termo sonică hibridă cu ultrasunete și Laser.

Pentru optimizarea unui proces de îmbinare este necesară cunoașterea influenței parametrilor de proces asupra calității îmbinărilor realizate.

Pentru aceasta, un obiectiv explicit al tezei are în vedere evidențierea și cuantificarea influențelor principale ale parametrilor tehnologici asupra caracteristicilor geometrice, structurale și funcționale ale îmbinărilor realizate prin procesele de microîmbinare investigate - microîmbinare eutectică, microîmbinare cu fascicul Laser și microîmbinare termosonică.

Programul experimental aferent tezei este derulat prin realizarea unor microîmbinări prin suprapunere (în puncte) a unor folii și fire cu dimensiuni de ordinul 30-500 μ m din următoarele materiale de bază:

- aluminiiu, cupru și argint în cazul unor elemente sub formă de lamele subțiri
- cupru, aur și argint pentru fire subțiri
- polimer cu transparență înaltă, respectiv cu transparență joasă (polipropilena) sub formă de folie.

La alegerea acestor materiale și forme s-au avut în vedere situațiile specifice ale îmbinărilor din componența microdispozitivelor electromecanice MEMS.

Pentru aprecierea calității microîmbinărilor s-au definit următoarele criterii:

- o rezistență mecanică suficientă pentru solicitările specifice exploatații îmbinărilor
- o rezistență electrică de contact cât mai mică.

Schema programului de cercetare este prezentată în figura 5.16.

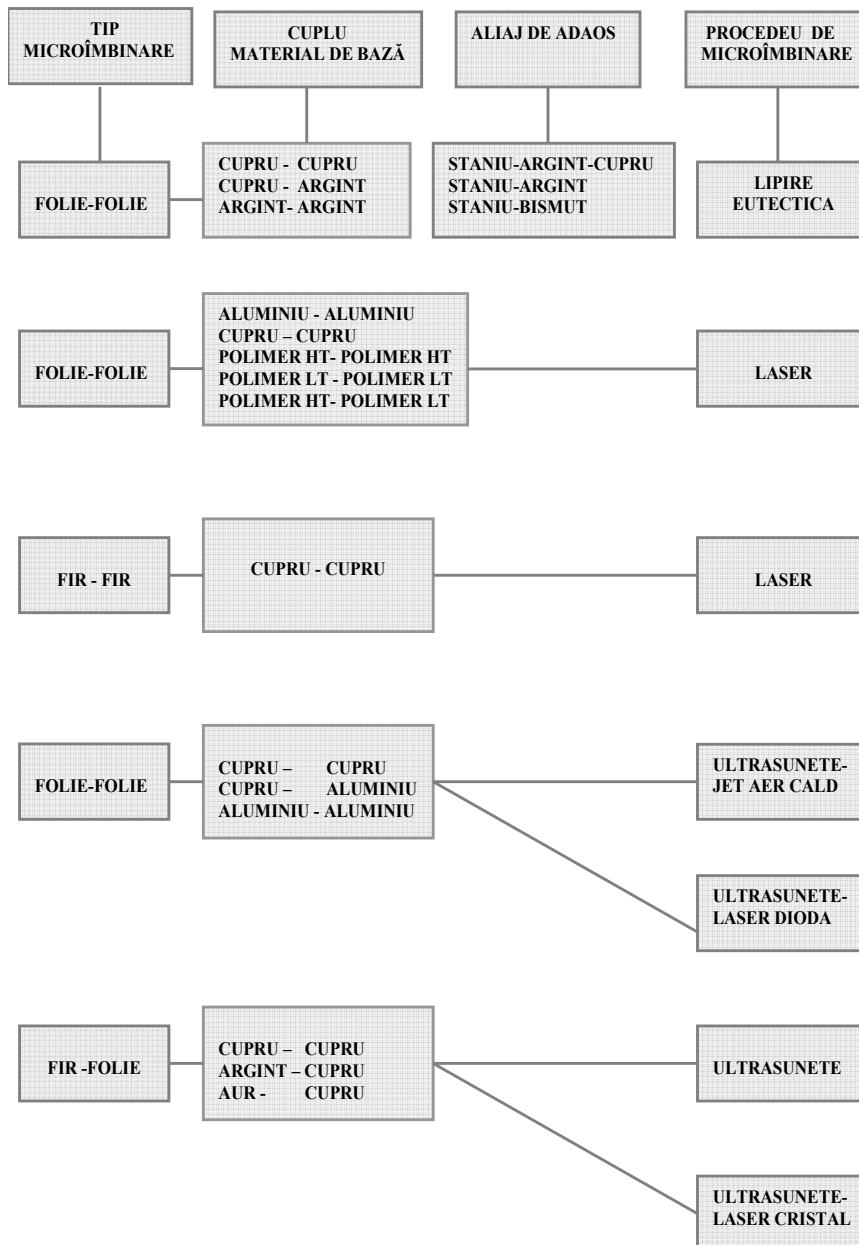


Figura 5.16 Schema programului de cercetare

6. Cercetări asupra procesului de microîmbinare eutectică

6.1 Programul experimental

Programul experimental urmărește optimizarea procesului de microîmbinare eutectică și constă în efectuarea de microîmbinări prin încălzire locală cu element rezistiv, termenii experimentărilor fiind:

- materiale de bază: cupluri cupru-cupru și cupru-argint, folii având grosimea de 0,3 mm și de 0,6 mm
- aliaje de microîmbinare: staniu-argint-cupru (95,5% Sn, 3,8% Ag 0,7 % Cu), staniu-argint (Sn, 3,5% Ag) și staniu-bismut (58% Bi, 42% Sn);
- curățare suprafețe: șlefuire cu abraziv, curățare cu alcool, decapare cu colofoniu
- depunere aliaj de lipire pe una sau pe ambele suprafețe participante la îmbinare
- suprapunere suprafețe și aplicarea din exterior a încălzirii rezistive.

6.2 Tehnologia de microîmbinare eutectică

Drept sursă termică se utilizează un cap rezistiv specializat, alimentat de la o stație digitală *Proskit 608-352NB Soldering Station* având o putere de 48 W și oferind posibilitatea unei reglări continue a temperaturii de operare între 150-420°C. Aliajele de îmbinare utilizate sunt alese sub formă de sârmă sau pastă, pentru facilitarea operării.

Suprafețele foliilor supuse procesului de microîmbinare sunt șlefuite cu hârtie abrazivă fină, menținându-se însă o anumită rugozitate care să ajute procesul de umectare. Ulterior șlefuirii s-a procedat la curățarea de oxizi și impurități prin decapare cu soluție de tip colofoniu. De asemenea, se asigură ca suprafețele foliilor ce se îmbină să nu fie deformate, pentru a nu se forma goluri de aer între ele, în timpul procesului de microîmbinare.

După ce suprafețele celor două componente s-au pregătit conform celor prezentate anterior se procedează la depunerea pe acestea, prin umectare, a aliajului de îmbinare. În figura 6.1 este prezentat aliajul de lipire depus pe suprafața componentei prin topirea sârmei de adaos. Prin încălzirea acestui material se realizează în continuare umectarea suprafețelor celor două componente, figura 6.2.

Cele două suprafețe acoperite de aliaj sunt aduse ulterior în contact intim (prin aplicarea unei presiuni care are rolul de a menține contactul constant și continuu între cele două suprafețe). În continuare se asigură încălzirea ansamblului celor două componente cu ajutorul sursei rezistive plasate în contact cu una dintre componente.



Figura 6.1 Particulă aliaj de lipit plasată pe suprafața curată [29]



Figura 6.2 Umeectarea cu aliaj ecologic de lipit[29]

Prin conducție termică aliajul de îmbinare este încălzit până la atingerea temperaturii de topire. La oprirea încălzirii se produce solidificarea materialului topit și formarea microîmbinării, figura 6.3. În figura 6.4 sunt prezentate probe realizate prin procedeul de microîmbinare eutectică și supuse caracterizării geometrico-dimensionale, morfo-structurale și din punct de vedere al microdurității.

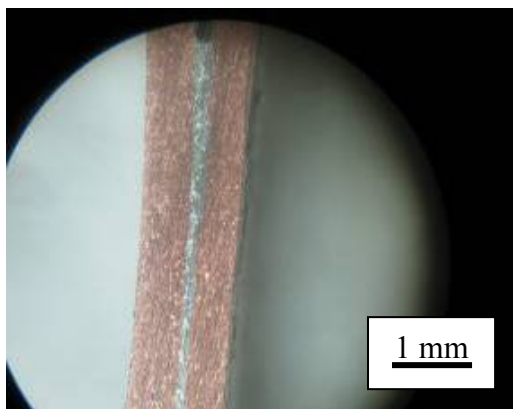


Figura 6.3 Microîmbinarea eutectică realizată

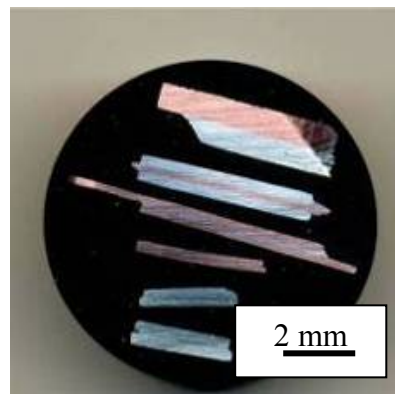


Figura 6.4 Microîmbinări Cu-Cu, Cu-Ag și Ag-Ag

Pentru fiecare combinație material de bază – material de adaos se efectuează microîmbinări la 3 temperaturi de încălzire (temperatura de topire a aliajului T_{top} , $T_{top} + 10^{\circ}\text{C}$ și $T_{top} + 20^{\circ}\text{C}$).

6.3 Caracterizarea microîmbinărilor eutectice

Ținând cont de funcționalitatea pe care trebuie să o aibă în exploatare, microîmbinările realizate sunt caracterizate din punct de vedere:

- morfo-structural (analiza microscopică a elementelor constitutive ale zonelor îmbinării)

- mecanic (caracteristici de rezistență mecanică, micro-duritate)
- funcțional (rezistența electrică).

Grosimea microîmbinării este de cca. 100 μm în cazul depunerii materialului de adaos pe o singură componentă și de cca. 200 μm în cazul depunerii pe ambele componente.

6.3.1 Caracterizare morfo-structurală

În tabelul 6.2 sunt prezentate îmbinările supuse caracterizării morfo-structurale, iar în tabelul 6.1 rezultatele examinării microscopice specifice acestui tip de caracterizare (Examinarea metalografică pe probe din cupru și argint este executată conform SR 5000 -1997).

Tabel 6.1 Analiza microscopică a microîmbinărilor eutectice

PROBĂ	STRUCTURA, CONFORM SR 5000-1997 [100 \times] *		MATERIAL DE BAZĂ
	MB	Lipire	
P1	Soluție solidă Cu α , cu incluziuni sferice izolate, de Cu ₂ O	Soluție solidă de Sn α , cu eutectic și compuși intermetalici Cu - Sn	Cu-Cu
P2	Soluție solidă Cu α , cu incluziuni sferice izolate, de Cu ₂ O	Soluție solidă de Sn α , cu eutectic Sn - Ag	Cu-Cu
P3.1	Soluție solidă Cu α , cu incluziuni sferice izolate de Cu ₂ O	Soluție solidă Bi α , cu eutectic Bi-Sn	Cu-Cu
P3.2	Soluție solidă Ag α	Soluție solidă Bi α , cu eutectic Bi-Sn	Cu - Ag
P4.1	Soluție solidă Cu α , cu incluziuni sferice izolate, de Cu ₂ O	Soluție solidă de Sn α , cu eutectic Sn - Ag	Cu - Ag
P4.2	Soluție solidă Ag α	Soluție solidă de Sn α , cu eutectic și compuși intermetalici Cu - Sn	Cu - Ag
P5.1	Soluție solidă Cu α , cu incluziuni sferice izolate, de Cu ₂ O	Soluție solidă de Sn α , cu eutectic și compuși intermetalici Cu - Sn	Cu-Cu
P5.2	Soluție solidă Ag α	Soluție solidă de Sn α , cu eutectic și compuși intermetalici Sn - Ag	Ag - Ag

Tabel 6.2 Microîmbinări eutectice realizate

PROBĂ	MATERIAL DE BAZĂ	ALIAJ DE LIPIRE ECOLOGIC	TEMPERATURĂ PROCES, [°C]
P1	Cupru - Cupru	Aliaj 95,5% Sn, 3,8% Ag, 0,7 % Cu	220
			230
			240
P2	Cupru - Cupru	Aliaj Sn, 3,5% Ag	220
			230
			240
P3.1	Cupru - Cupru	Aliaj 58% Bi, 42% Sn	170
			180
			190
P3.2	Cupru - Argint	Aliaj 58% Bi, 42% Sn	170
			180
			190
P4.1	Cupru - Argint	Aliaj Sn, 3,5% Ag	220
			230
			240
P4.2	Cupru - Argint	Aliaj 95,5% Sn, 3,8% Ag, 0,7 % Cu	220
			230
			240
P5.1	Cupru - Cupru	Aliaj 95,5% Sn, 3,8% Ag, 0,7 % Cu	220
P5.2	Argint - Argint	Aliaj 95,5% Sn, 3,8% Ag, 0,7 % Cu	240

Microstructurile probelor nr. P1, P2, P3.1, P4.2, P4.1, și P3.2 sunt prezentate în figurile: 6.5 și 6.6.

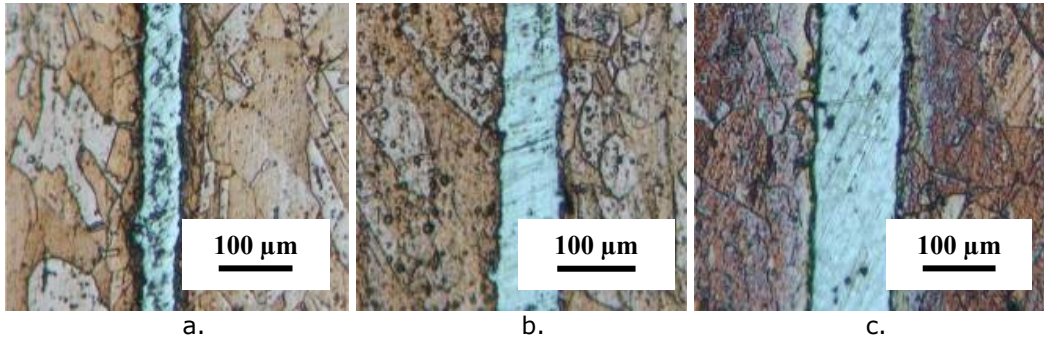


Figura 6.5 Probe îmbinate Cu-Cu,
a. Aliaj Sn-Ag-Cu, b. aliaj Sn-Ag, c. aliaj Sn-Bi [Cl. cupr. amon., 100×]

Principalele observații legate de influențarea morfo-structurii microîmbinărilor Cu-Cu sunt:

- În cazul aliajului Sn-Ag-Cu: Experimentările de microîmbinare la temperaturi diferite (Tabel 6.2) evidențiază faptul că la creșterea temperaturii de proces are loc o intensificare a proceselor de formare a compușilor intermetalici Cu-Sn (volumul acestora crește o dată cu temperatura de microîmbinare), efect pus pe seama intensificării proceselor de difuzie a staniului către materialul de bază și a cuprului către zona de lipire
- În cazul aliajului Sn-Ag: Experimentările de microîmbinare la temperaturi diferite (Tabel 6.2) evidențiază faptul că la creșterea temperaturii de proces are loc o intensificare a proceselor de formare a compușilor intermetalici Sn-Ag prin intensificarea reacțiilor dintre Sn și Ag
- Oxizii de Cu provin din procesul de curățare cu alcool a suprafețelor de îmbinat înainte de decaparea cu colofoniu.

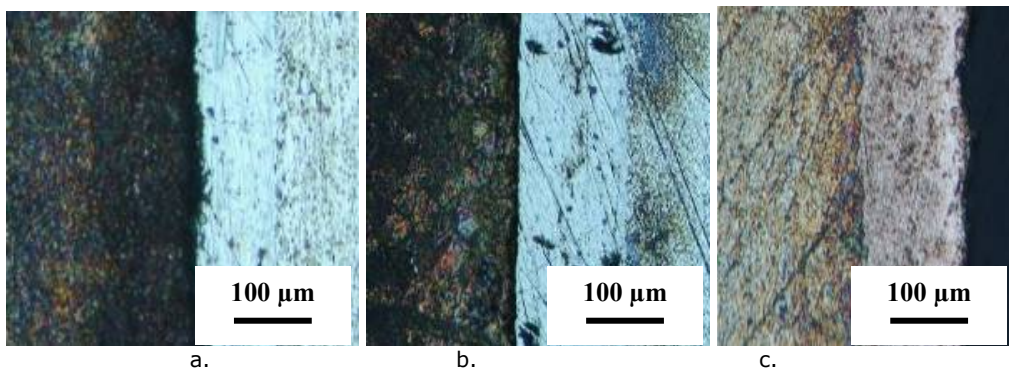


Figura 6.6 Probe îmbinate Cu-Ag,
a. Aliaj Sn-Ag-Cu, b. aliaj Sn-Ag, c. aliaj Sn-Bi [Cl. cupr. amon., 100×]

Principalele observații legate de influențarea morfo-structurii microîmbinării Cu-Ag sunt:

- În cazul aliajului Sn-Ag-Cu: Creșterea temperaturii de proces conduce la

intensificarea proceselor de formare a compuşilor intermetalici Sn-Bi prin intensificarea reacţiilor dintre cele două elemente

- În cazul aliajului Sn-Ag: Creşterea temperaturii de proces conduce la intensificarea proceselor de formare a compuşilor intermetalici Sn - Ag prin intensificarea reacţiilor dintre Sn și Ag
- Datorită temperaturii scăzute Ag nu difuzează sensibil către aliajul de lipire.
- Oxizii de Cu provin din procesul de curăţare cu alcool a suprafeţelor de îmbinat înainte de decaparea cu colofoniu.

6.3.2 Caracterizare din punct de vedere mecanic

6.3.2.1 Încercarea la tracţiune a microîmbinărilor eutectice

Pentru determinarea principalelor caracteristici de rezistenţă ale îmbinărilor, acestea sunt supuse unor încercări de tracţiune. Echipamentul utilizat pentru încercare este o maşină de încercare de tip TC100-A009 figura 6.7, dezvoltând o forţă maximă de 100 kN, figura 6.8.[28] Dimensiunile probelor îmbinate supuse încercării la tracţiune sunt prezentate în figura 6.9.



Figura 6.7 Echipamentul de încercare utilizat

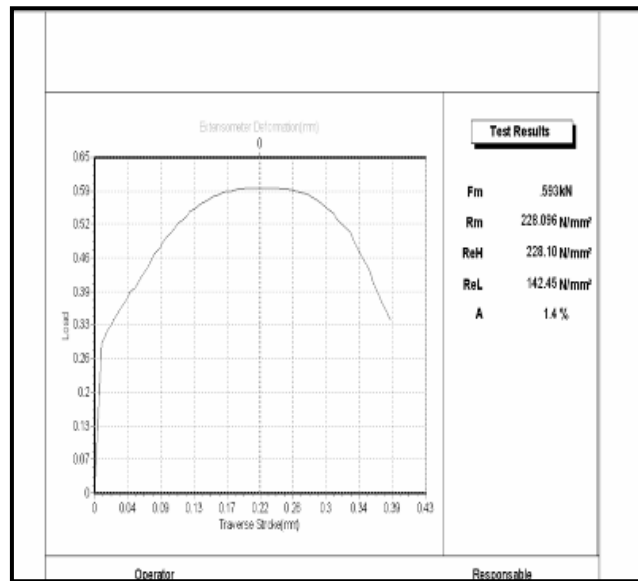


Figura 6.8 Inregistrare a curbei tensiune - deformatie

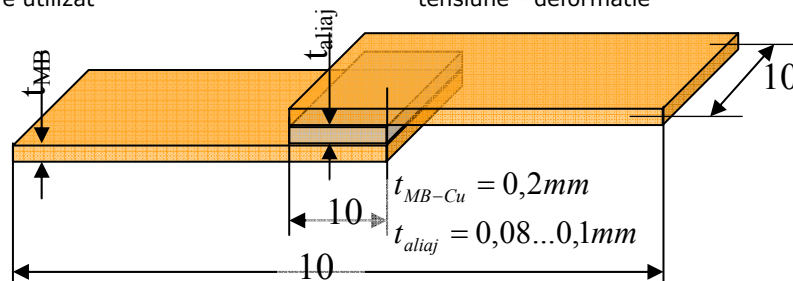


Figura 6.9 Caracteristicile geometrico-dimensionale ale epruvetelor încercate



Figura 6.10 Probele obținute prin lipire eutectică : P6 cu aliaj de lipit Sn-Ag, P2 cu aliaj de lipit Sn-Ag-Cu, si P9 cu aliaj Sn-Bi

Sunt supuse încercărilor la tracțiune două tipuri de probe realizate din folii de cupru cu grosimea de 200 μm .

Varianta 1: aliaj depus pe unul dintre materialele de bază, încălzire aplicată din exteriorul acestui material de bază (Figura 6.11). La încercările preliminare de tracțiune 3 dintre cele 9 probe considerate se rup în zona îmbinată, motiv pentru care această variantă este abandonată.

Varianta 2: aliaj depus pe fiecare dintre cele două materiale de bază, încălzire aplicată din exteriorul unuia dintre materialele de bază (Figura 6.12)

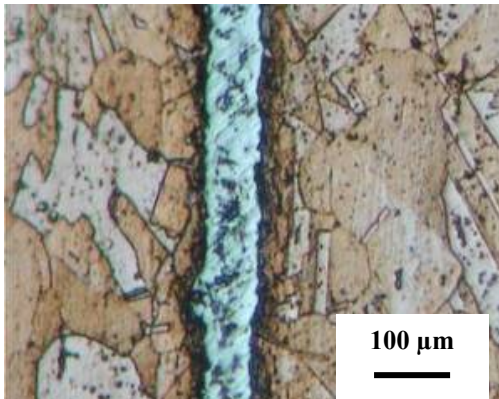


Figura 6.11 Îmbinare cu aliaj depus pe unul dintre cele două materiale de bază

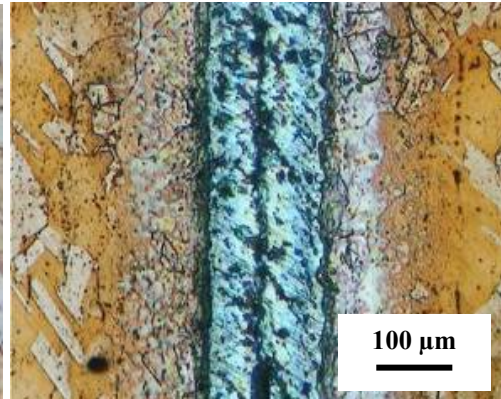


Figura 6.12 Îmbinare cu aliaj depus pe ambele materiale de bază

Rezistența la rupere este calculată după formula :

$$R_{rupere} = \frac{F[N]}{S[mm^2]} \quad (6.1)$$

În care F = Forța la rupere [N] și S= aria suprafeței [mm²]

Se calculează după această formulă rezistența la rupere pentru cele 8 epruvete încercate la tracțiune (forfecare), iar valorile se vor pune în tabelul 6.3

$$F1 = 0,515[kN] = 515[N]; S1 = 0,2mm \times 10 mm = 2mm^2;$$

$$Rr = F1/ S1 = 515/2 = 257,5[N/mm^2] \quad (6.2)$$

$$F2 = 0,605[kN] = 605[N] S2 = 0,2mm \times 10 mm = 2mm^2;$$

$$Rr = F2/ S2 = 605/2 = 302,5[N/mm^2] \quad (6.3)$$

$$F3 = 0,408[kN] = 408[N] S3 = 0,2mm \times 10 mm = 2mm^2;$$

$$Rr = F3/ S3 = 408/2 = 204[N/mm^2] \quad (6.4)$$

$$F4 = 0,593[kN] = 593[N] S4 = 0,2mm \times 10 mm = 2mm^2;$$

$$Rr = F4/ S4 = 593/2 = 296,5[N/mm^2] \quad (6.5)$$

$$F5 = 0,720[kN] = 720[N] S5 = 0,2mm \times 10 mm = 2mm^2;$$

$$Rr = F5/ S5 = 720/2 = 360[N/mm^2] \quad (6.6)$$

$$F6 = 0,688[kN] = 688[N] S6 = 0,2mm \times 10 mm = 2mm^2;$$

$$Rr = F6/ S6 = 688/2 = 344[N/mm^2] \quad (6.7)$$

$$F7 = 0,608[kN] = 608[N] S7 = 0,2mm \times 10 mm = 2mm^2;$$

$$Rr = F7/ S7 = 608/2 = 304[N/mm^2] \quad (6.8)$$

$$F9 = 0,637[kN] = 637[N] S9 = 0,2mm \times 10 mm = 2mm^2;$$

$$Rr = F9/ S9 = 637/2 = 318,5[N/mm^2] \quad (6.9)$$

În tabelul 6.3 se prezintă rezistența la rupere a probelor obținute prin lipire eutectică, cu specificarea locului de rupere a epruvetei pentru probele realizate în varianta 2

Tabel 6.3 Valorile rezistențelor la rupere a probelor realizate prin îmbinare eutectică

Nr. Proba	Cuplu material de bază	Aliaj de lipit Eutectic *	Temperatura de topire aliaj eutectic[°C]	Rezistența la rupere [N/mm ²]	Locul ruperii
P1	Cupru-Cupru	SAC	220	257,5	MB
P2	Cupru-Cupru	SAC	230	302,5	MB
P3	Cupru-Cupru	SAC	240	204	MB
P4	Cupru-Cupru	SA	220	296,5	MB
P5	Cupru-Cupru	SA	230	360	MB
P6	Cupru-Cupru	SA	240	344	MB
P7	Cupru-Cupru	SB	170	304	MB
P8	Cupru-Cupru	SB	180	Dezlipire	
P9	Cupru-Cupru	SB	190	318,5	MB

*SAC-aliaj Sn 95,5Ag 3,6Cu 0,7; SA-aliaj Sn 96,5Ag 3,5; SB- aliaj42Sn58Bi

În urma încercărilor la tracțiune se obțin probe care se rup în materialul de bază ca în figura 6.13



Figura 6.13 Probele după încercarea la tracțiune: P2 – cu aliaj SAC, P6 – cu aliaj SA și P9 cu aliaj SB

În urma derulării încercărilor de tracțiune s-au constatat următoarele:

- Din cele 9 epruvete supuse încercării 8 epruvete s-au rupt în materialul de bază, o epruveta s-a desprins.
- Desprinderea îmbinării numărul 8 este pusă pe seama unei pregătiri necorespunzătoare, situație în care între cele două straturi de aliaj depuse s-au format oxizi care au împiedicat realizarea unui contact corespunzător înainte de aplicarea sursei termice. Condițiile în care s-a realizat pregătirea efectivă probelor nu au fost cele specifice camerelor albe sau gri, situații regăsite în industria electronică, ci în atmosfera specifică laboratoarelor obișnuite.
- Indiferent de tipul aliajului de îmbinare probele au manifestat deformații elastice de valoare mică, urmate de deformații plastice sensibil mai mari, situație datorată caracteristicilor mecanice proprii ale materialului de bază.
- Forța maximă atinsă s-a situat în domeniul 0,450...0,700 kN (figura 6.14), valoare relativ mare comparativ cu forțele care s-ar putea manifesta în circuitele electronice cărora le sunt destinate îmbinările.

În continuare se efectuează o analiză de regresie statistică, pentru a evalua dependența dintre forța de rupere și temperatura procesului de îmbinare. Pentru îmbinările realizate pe materialul de bază cupru-cupru, sunt determinate următoarele ecuații de regresie pentru cele 3 materiale de adaos utilizate:

$$- \text{Aliaj Sn-Ag-Cu} \quad F = - 0,006 T^2 + 0,044 T + 0,566 \quad (6.10)$$

$$- \text{Aliaj Sn-Ag} \quad F = - 0,02 T^2 + 0,546 T - 2,998 \quad (6.11)$$

$$- \text{Aliaj Sn- Bi} \quad F = -0,037 T^2 + 0,9417 T - 5,3509 \quad (6.12)$$

Dependențele obținute sunt prezentate în figura 6.15.

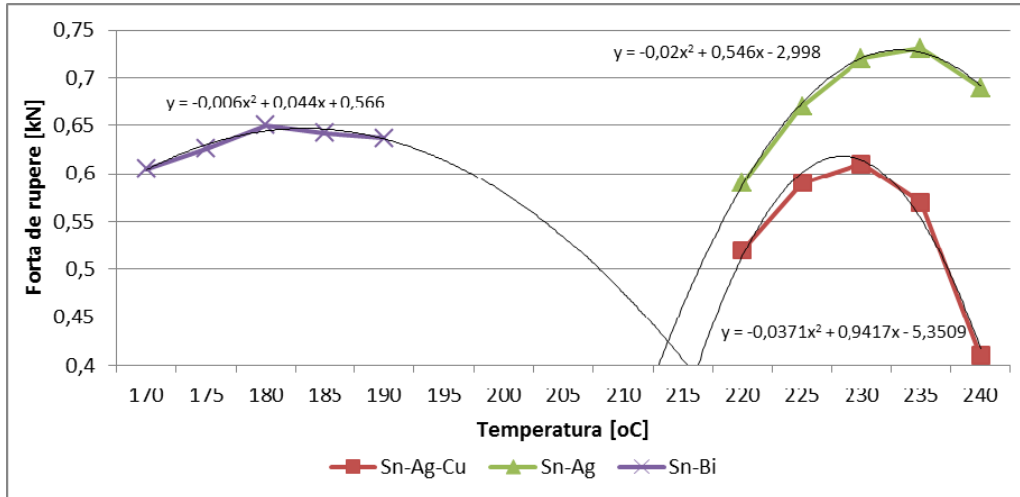


Figura 6.14 Dependenta forței de rupere a îmbinării de temperatura de proces, materiale de bază Cupru-Cupru

Se observă că, indiferent de materialul de adaos utilizat, forța de rupere prezintă un maxim la o temperatura cu cca 10 °C mai mare decât temperatura de topire a aliajului de lipit.

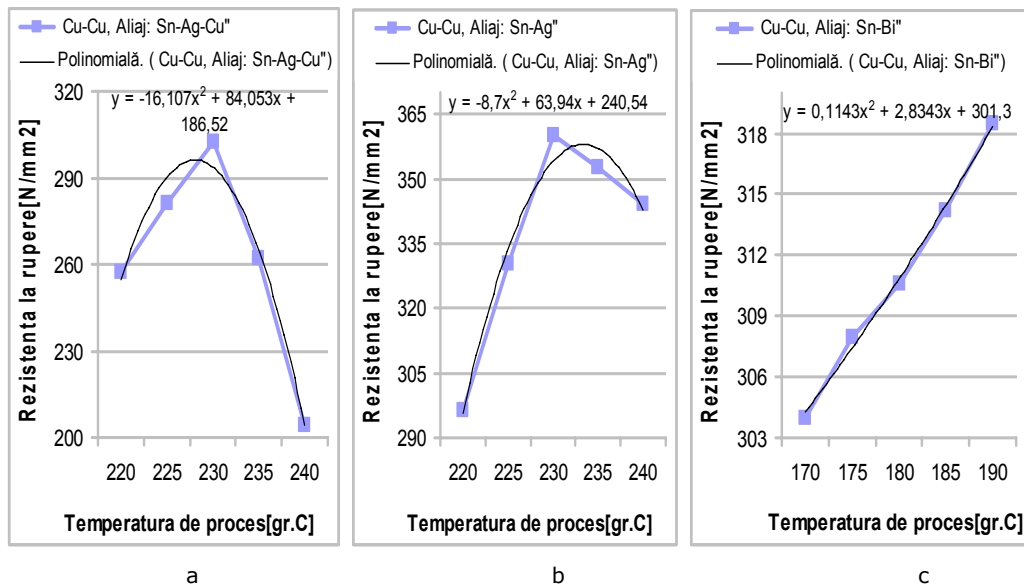


Figura 6.15 Dependenta rezistenței mecanice la rupere a îmbinării în funcție de temperatura procesului de îmbinare și aliajul folosit: a) Sn-Ag-Cu, b) Sn-Ag, c) Sn-Bi

Pentru microîmbinările realizate pe materialul de bază cupru-cupru sunt determinate următoarele ecuații de regresie pentru cele 3 materiale de adaos utilizate:

$$\text{a) Aliaj Sn-Ag-Cu: } R_{\text{mec.rup.}} = -16,107T^2 + 84,053T + 186,52 \quad (6.13)$$

$$\text{b) Aliaj Sn-Ag : } R_{\text{mec.rup.}} = -8,7T^2 + 63,94T + 240,54 \quad (6.14)$$

$$\text{c) Aliaj Sn-Bi : } R_{\text{mec.rup.}} = 0,1143T^2 + 2,8343T + 301,3 \quad (6.15)$$

În care $R_{\text{mec.}}$ -Rezistența mecanică la rupere [N/mm^2]; T -temperatura procesului de îmbinare [$^{\circ}\text{C}$]

6.3.2.2 Încercări de microdurate HV 0,01

Pentru a avea o imagine mai cuprinzătoare asupra caracteristicilor mecanice ale microîmbinărilor eutectice se consideră oportună efectuarea unor încercări de microdurate asupra unor îmbinări realizate cu diverse tipuri de aliaje de îmbinare. Întrucât pentru încercarea de microdurate este posibilă utilizarea unor probe cu dimensiuni relativ reduse, sunt efectuate încercări de microdurate în cazul îmbinărilor având ca material de bază argint sau al îmbinărilor disimulare între argint și cupru. Astfel de îmbinări nu pot fi încercate la tracțiune datorită inaccesibilității materialului de bază (argint). Încercarea de microdurate este realizată prin metoda Vickers cu o sarcină de 200 gr utilizând microdurimetrul prezentat în figura 6.16.



Figura 6.16 Microdurimetru pentru încercarea la duritate a probelor

Rezultatele încercărilor de microdurate sunt prezentate în tabelele 6.4, 6.5 și 6.6, respectiv în figurile 6.17, 6.18, 6.19, 6.20, 6.21, 6.22 și 6.23.

Tabel 6.4 Valorile măsurate ale duriții microîmbinărilor eutectice la cuplul Cupru- Cupru

NR PROBA	M.B	ALIAJ DE LIPIT	TEMP. PROCES [°C]	DURITATE HV 0,01						
				MB	ZIT	MICRO ÎMBINARE EUTECTICA			ZIT	MB
P1-1	Cu-Cu	SAC*	220	45,0	50,3	21,7	15,1	20,6	68,1	52,5
P1-2	Cu-Cu	SAC	230	56,0	64,2	29,2	36,3	18,7	59,2	49,8
P1-3	Cu-Cu	SAC	240	55,4	56,0	36,6	25,1	22,8	58,5	57,2
P2-1	Cu-Cu	SA*	220	53,0	47,8	33,0	33,6	33,6	51,4	47,3
P2-2	Cu-Cu	SA	230	46,4	43,3	30,2	30,2	32,2	51,4	56,0
P2-3	Cu-Cu	SA	240	57,2	50,3	25,8	20,3	20,6	56,0	46,4
P3-1	Cu-Cu	SB*	170	47,8	36,6	26,4	37,3	31,7	60,6	53,0
P3-2	Cu-Cu	SB	180	54,2	52,5	30,9	27,9	31,9	54,2	48,8
P3-3	Cu-Cu	SB	190	44,2	48,8	27,9	25,1	23,1	56,0	51,9

*SAC- aliaj Sn 95,5Ag 3,6Cu 0,7; SA- aliaj Sn 96,5Ag 3,5; SB- aliaj 42Sn58Bi

Tabel 6.5 Valorile microduriții îmbinărilor eutectice la cuplul de materiale Cupru- Argint

NR. PROB A	MB	ALIAJ DE LIPIT	TEMP. PROCES [°C]	DURITATE HV 0,01						
				MB Cu	ZIT Cu	MICRO ÎMBINARE EUTECTICA			ZIT Ag	MB Ag
P3-4	Cu-Ag	SB*	170	48,8	55,4	24,2	24,9	24,0	82,4	82,4
P3-5	Cu-Ag	SB	180	43,3	45,4	22,5	22,2	22,0	68,1	68,1
P3-6	Cu-Ag	SB	190	42,9	47,8	28,5	22,8	28,1	70,7	72,2
P4-1	Cu-Ag	SA*	220	49,3	48,8	30,2	28,4	26,4	79,2	68,7
P4-2	Cu-Ag	SA	230	40,1	46,4	26,0	25,8	28,4	61,5	64,3
P4-3	Cu-Ag	SA	240	44,2	43,3	20,9	20,6	20,6	47,3	53,0
P4-4	Cu-Ag	SAC*	220	41,3	64,2	21,7	22,8	21,7	65,7	66,5
P4-5	Cu-Ag	SAC	230	56,0	54,2	18,4	18,3	20,6	77,2	69,8
P4-6	Cu-Ag	SAC	240	48,8	64,2	30,5	29,7	34,2	69,8	64,2

*SAC= Sn 95,5Ag 3,6Cu 0,7; SA= Sn 96,5Ag 3,5; SB= 42Sn58Bi

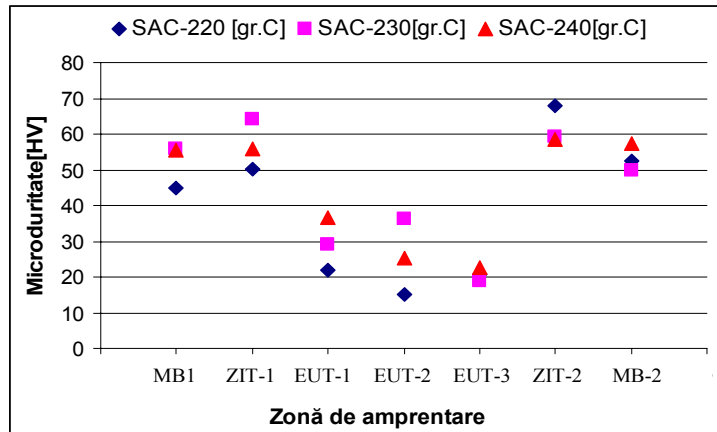


Figura 6.17 Evoluția microduranței la îmbinări eutectice Cu/Cu în funcție de aliajul eutectic Sn-Ag-Cu și temperatura de proces[77]

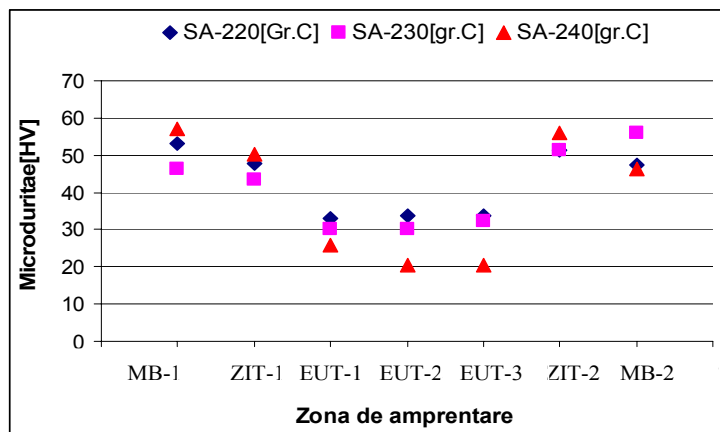


Figura 6.18 Evoluția microduranței la îmbinări eutectice Cu/Cu în funcție de aliajul eutectic Sn-Ag și temperatura de proces[77]

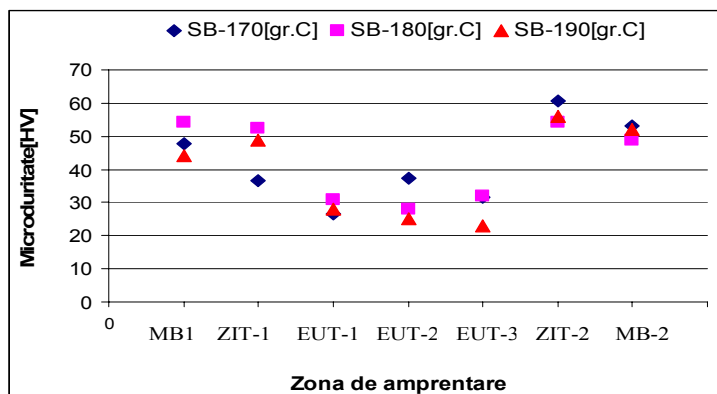


Figura 6.19 Evoluția microduranței la îmbinări eutectice Cu/Cu în funcție de aliajul eutectic Sn-Bi și temperatura de proces

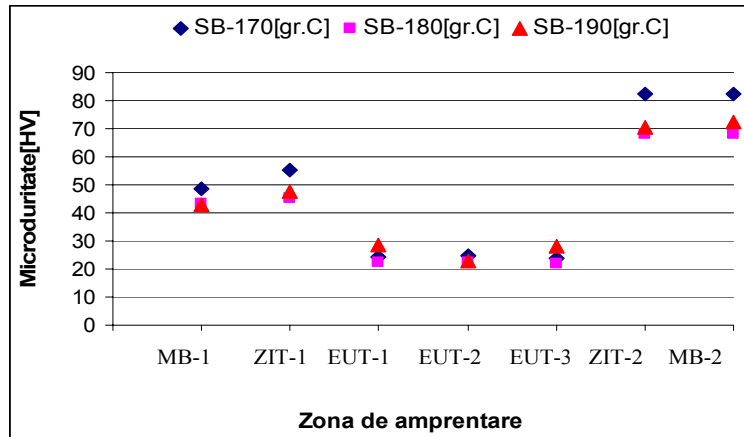


Figura 6.20 Evoluția microdureții la îmbinări eutectice Cu/Ag în funcție de aliajul eutectic Sn-Bi și temperatura de proces

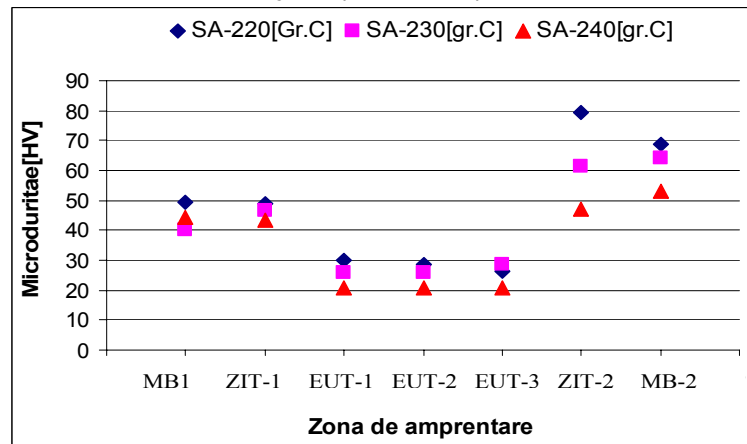


Figura 6.21 Evoluția microdureții la îmbinări eutectice Cu/Ag în funcție de aliajul eutectic Sn-Ag și temperatura de proces

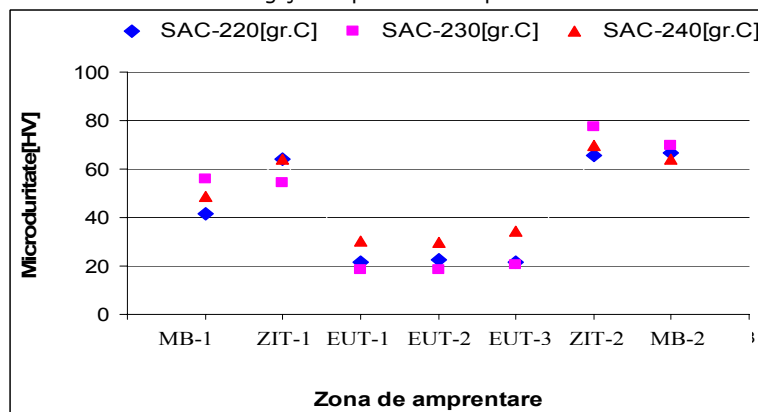


Figura 6.22 Evoluția microdureții la îmbinări eutectice Cu/Ag în funcție de aliajul eutectic Sn-Ag-Cu și temperatura de proces

Tabel 6.6 Valorile măsurate ale durtății microîmbinărilor eutectice la cuplul de materiale Argint- Argint

NR. PROB A	M.B	ALIAJ DE LIPIT	TEMP. DERULARE PROCES [°C]	DURITATE HV 0,01						
				MB Ag	ZIT Ag	MICRO ÎMBINARE EUTECTICA			ZIT Ag	MB Ag
P5-4	Ag-Ag	SAC*	230	82,4	74,3	18,4	18,4	16,7	82,4	90,7
P5-5	Ag-Ag	SAC	240	74,3	75,2	55,4	46,4	45,4	69,8	80,3

*SAC= Sn 95,5Ag 3,6 Cu 0,7

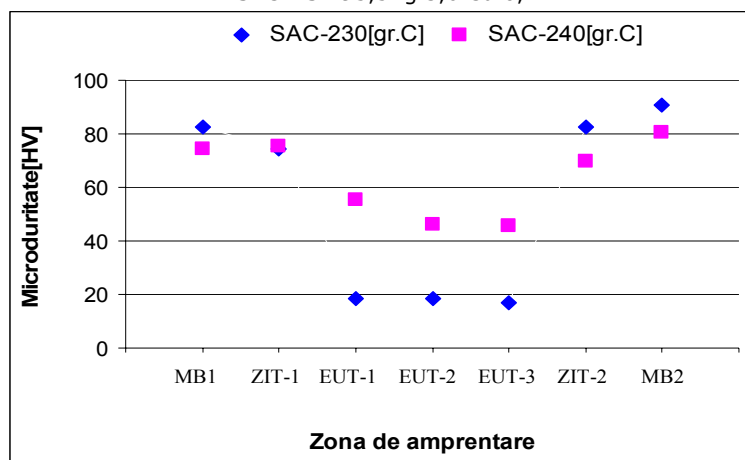


Figura 6.23 Evoluția microdurtății la îmbinări eutectice Ag/Ag în funcție de aliajul eutectic Sn-Ag-Cu și temperatura de proces

Încercările de microdurtate au relevat următoarele concluzii:

- În îmbinarea eutectică se produce o scădere semnificativă a durtății față de durtatea materialului de bază, indiferent de tipul acestuia, de tipul aliajului de lipit și de valoarea temperaturii de proces
- Durtatea zonei influențate termic este apropiată de durtatea materialului de bază
- La modificarea temperaturii de proces evoluția durtății este condiționată de tipul aliajului de lipit, în general, durtatea îmbinării scade cu creșterea acestei temperaturi.

6.3.3 Caracterizare funcțională (rezistența electrică de contact)

Pentru a efectua măsurarea rezistenței de contact se efectuează mai întâi curățarea probelor metalice cu alcool etilic, acetonă și triclor-etilenă.

În acest scop, se folosește următoarea secvență de curățare:

- curățare cu alcool etilic
- curățare în acetonă
- curățare în triclor-etilenă

În continuare, este efectuată curățarea oxizilor de pe probe, folosindu-se aceeași soluție pentru cupru, și anume soluția standard de corodare a cuprului, într-o diluție de 1:1 cu apă deionizată. Probele sunt ținute aproximativ 10 secunde în soluție, urmărindu-se permanent schimbarea culorii acestora. După aceasta,

probele sunt scoase, clătite cu apă deionizată și uscate în jet de aer. În cazul probelor de cupru lipite cu eutectic, observarea comportamentului în timpul curățării oxidizilor se face pe partea vizibilă a eutecticului, acesta oxidându-se extrem de rapid (apare culoarea specific neagră). Ca atare, se reconsideră timpul de curățare astfel încât să nu se pericliteze acest strat. Măsurarea rezistențelor electrice a unor elemente conductoare se face conform standardului: SR EN 50383:2011 prin două metode și anume prin metoda celor două sonde, respectiv, prin metoda celor patru sonde.

Metoda celor două sonde este prezentată schematic în figura 6.24, semnificația notațiilor din figură fiind următoarea:

R_A – impedanța ampermetrului

R_V – impedanța voltmetrului

R_{contact1} – impedanța de contact între electrodul 1 și eșantion (include și impedanța firelor de la sursa de curent până la vârful electrodului),

R_{contact2} – impedanța de contact între electrodul 2 și eșantion (include și impedanța firelor de la sursa de curent până la vârful electrodului),

R_{contact} – impedanța de contact la contactul dintre metale,

R_{metal} – impedanța porțiunii de eșantion cuprinsă între electrodul 1 și contactul dintre metale, respectiv între contactul dintre metale și electrodul 2 (aceste marimi au fost considerat egale).

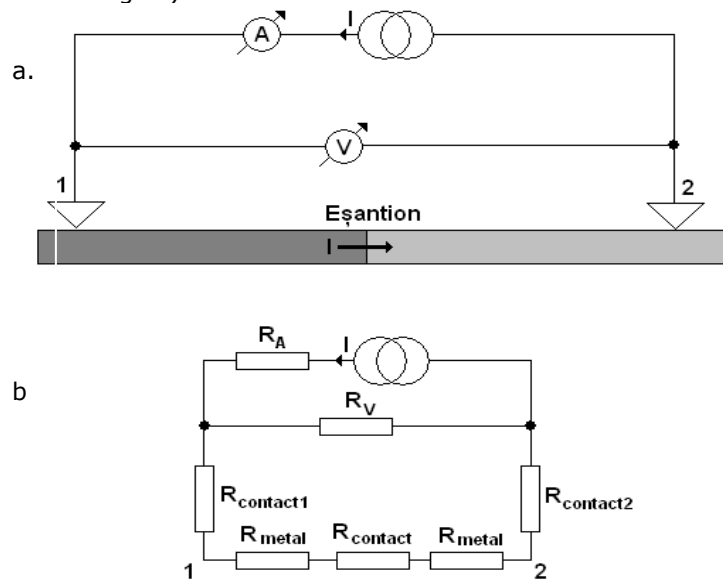


Figura 6.24 Metoda celor două sonde.

a. schița conexiunilor; b. schema electrică echivalentă [76]

Metoda celor patru sonde este prezentată în figura 6.25. Această metodă este mai complicată decât precedenta, precizia de determinare fiind însă mai mare, mai ales în cazul unor rezistențe electrice de valori reduse. În figura 6.28 se efectuează următoarele notații:

R_{contact3} – impedanța de contact între electrodul 3 și eșantion (include și impedanța firelor de la voltmetru până la vârful electrodului),

R_{contact4} – impedanța de contact între electrodul 4 și eșantion (include și impedanța firelor de la sursa de curent până la vârful electrodului),
 R_{contact} – impedanța de contact la contactul dintre metale,
 R''_{metal} – impedanța porțiunii de eșantion cuprinsă între electrodul 2 și contactul dintre metale, respectiv între contactul dintre metale și electrodul 3 (le-am considerat egale pentru cele două părți),
 R'_{metal} – impedanța porțiunii de eșantion cuprinsă între electrodul 1 și electrodul 2, respectiv între electrodul 3 și electrodul 4 (cele două marimi au fost considerat egale).

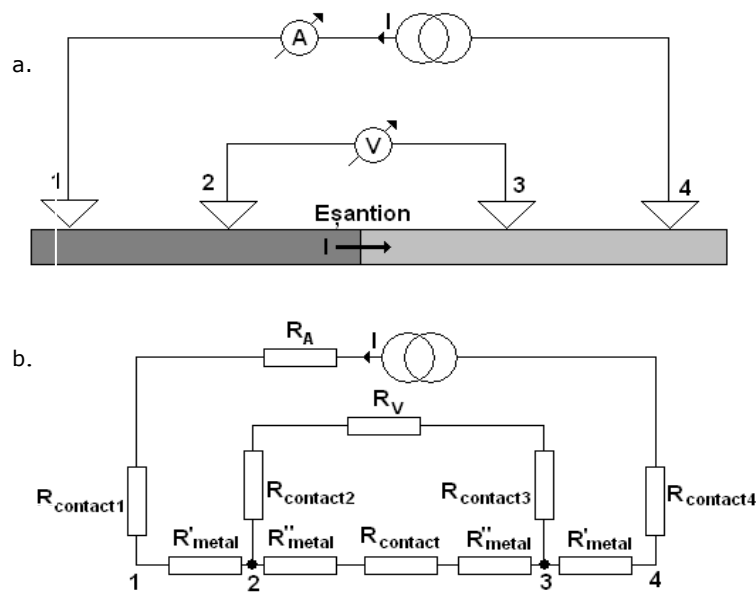


Figura 6.25 Metoda celor patru sonde.
 a. schița conexiunilor, b. schema electrică echivalentă [76]

Trebuie menționat faptul că probele fiind realizate din metale foarte bune conducătoare de electricitate (cupru, argint) rezistența electrică a lor este foarte mică. Rezistențele de contact între metale sunt de ordinul a câțiva $\mu\Omega$ - câțiva $m\Omega$, [76]. Aceasta înseamnă că la efectuarea încercării de rezistență electrică trebuie lucrat cu precauții speciale pentru a elimina sursele parazite de zgomot, fiind necesară utilizarea unor ecranări electrice.

Pentru asigurarea unei ecranări electrice este construită o cutie specială în care se introduc probele îmbinate. În această cutie din textolit placat pe ambele fețe cu cupru se realizează orificii pentru introducerea cablurilor de curent (electrozii 1 și 4) și, respectiv, de tensiune (electrozii 2 și 3). Se folosesc conductori ecranăți, ecranul fiind conectat la exteriorul cutiei, pe stratul de cupru. De asemenea, la celălalt capăt, ecranul celor două cabluri bifilare (1-4 și 2-3) sunt conectate la masa ampermetrului și, respectiv, a voltmetrului. În interior pereții de cupru sunt acoperiți cu hârtie specială pentru a evita producerea unor scurtcircuite la contactul dintre probă și pereții de cupru. Sunt testate probe cu lungimea 100 mm, respectiv 25 mm, cea de a doua dimensiune corespunzând lungimii efective a îmbinării (de suprapunere a celor două materiale).

Tabel 6.7 Masurări rezistențe electrice de contact probe microîmbinări eutectice, materiale de bază: Cupru-Cupru

Aliaj eutectic	Temperatura Proces[°C]	Lungime probă [mm]	Rezistența electrică R_s [mΩ]	Rezistența electrică R [m Ω]	Diferența R [mΩ]
SAC*	220	100	1,30	1,01	0,29
SAC	220	25	0,41		
SAC	230	100	1,64	1,00	0,64
SAC	230	25	0,41		
SAC	240	100	1,46	1,01	0,45
SAC	240	25	0,6		
SA*	220	100	1,31	1,02	0,29
SA	220	25	0,51		
SA	230	100	1,53	1,01	0,52
SA	230	25	0,63		
SA	240	100	1,56	0,99	0,57
SA	240	25	0,41		
SB	170	100	1,46	1,0	0,46
SB*	170	25	0,4		
SB	180	100	1,38	1,02	0,36
SB	180	25	0,48		
SB	190	100	1,31	1,00	0,31
SB	190	25	0,46		

*Sn95,5Ag3,8Cu0,7 ; Sn96,5Ag 3,5; Sn42 Bi 58

Valorile obținute sunt prelucrate statistic prin calcul de regresie. În figura 6.26 sunt prezentate dependențele dintre valorile rezistenței electrice și temperatura procesului de îmbinare pentru cazul celor 3 aliaje de lipit utilizate.

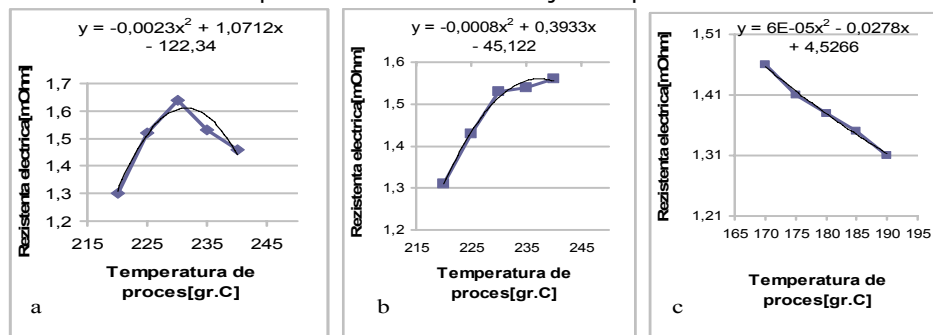


Figura 6.26 Dependența dintre valorile rezistențelor electrice și temperatura procesului de îmbinare utilizând ca aliaj de lipit: a)Sn-Ag-Cu, b)Sn-Ag și c) Sn-Bi

Ecuatiile sunt de formă polinomială de ordinul 2 și sunt prezentate sub forma:

$$\text{a) Aliaj Sn-Ag-Cu} \quad R_s = -0,0023 T^2 + 1,0712T - 122,34 \quad (6.16)$$

$$\text{b) Aliaj Sn-Ag} \quad R_s = -0,0008T^2 + 0,3933T - 45,122 \quad (6.17)$$

$$\text{c) Aliaj Sn-Bi} \quad R_s = 6E-0,5 T^2 - 0,0278T + 4,5266 \quad (6.18)$$

În care R_s - rezistența electrică la probele sudate [mΩ]; T - temperatura procesului de îmbinare [°C].

Se observă din figura 6.26 că rezistența electrică de contact are un maxim cu o valoare de 1,64 mΩ, valorile rezistențelor de contact minime sunt mai favorabile.

În figura 6.27 sunt prezentate grafic dependențele rezistențelor electrice și temperatura procesului de microîmbinare, de asemenea diferențele dintre valorile rezistențelor electrice măsurate a probelor neîmbinate cu valorile rezistențelor electrice de contact a probelor îmbinate prin lipire eutectică

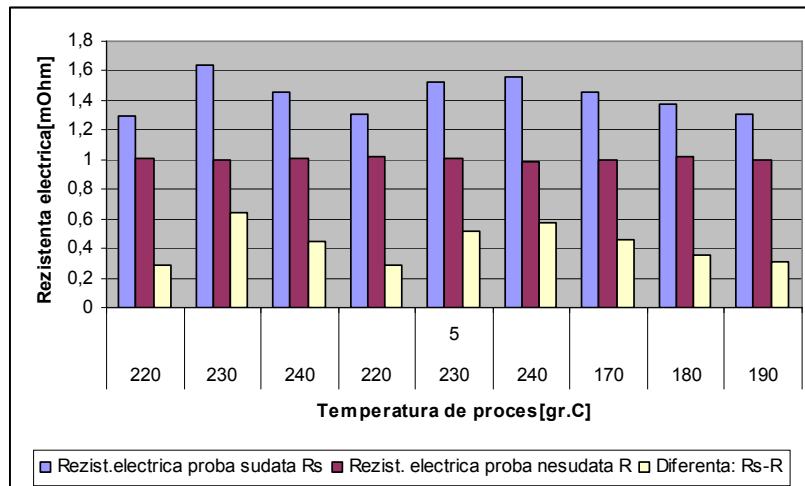


Figura 6.27 Rezistențele electrice în funcție de temperatura procesului de îmbinare

Se observă că maximum de rezistență electrică de contact este prezentat la temperatura de 230°C, unde se utilizează ca aliaj de lipit Sn-Ag-Cu, la polul opus valoarea cea mai mică a rezistenței electrice de contact este reprezentată la temperatura de 220 °C folosind un aliaj Sn-Ag-Cu. Între valorile rezistențelor electrice de contact la probele îmbinate și valorile rezistențelor electrice în timpul când probele nu erau lipite nu sunt diferențe semnificative, rezultând rezistențe electrice de contact favorabile. Valorile rezistențelor de contact la probele îmbinate au rezultate favorabile și din cauza procesului de microîmbinare ce s-a desfășurat în condiții bune de lucru, de asemenea pregătirea suprafețelor în vederea umectării cu aliaj de lipit este foarte bine executată, rezultate care se verifică și la încercarea de forfecare (tracțiune). De asemenea foliile de cupru ce se îmbină sunt plane, nu au lovituri, urme pe suprafețele de îmbinat, lucru ce ușurează îmbinarea acestora și în același timp neexistența golurilor ce puteau să se formeze după îmbinarea prin lipire eutectică.

6.4 Imperfecțiuni de material specifice microîmbinărilor eutectice

La realizarea microîmbinărilor eutectice pot să apară o serie de imperfecțiuni care se pot dezvolta în defecte cu efect negativ asupra comportării îmbinărilor sudate. Astfel de imperfecțiuni sunt:

- Microîmbinări cu exces de aliaj - au aspect sferic și cum de obicei aliajele de îmbinare au rezistență mecanică mai mică decât materialele de bază rezultă o mărire a volumului de material cu caracteristici mecanice scăzute;
- Microîmbinări cu lipsa de aliaj - datorită cantității insuficiente de aliaj de îmbinare reacția eutectică este mai redusă în intensitate și nu acoperă integral suprafața de contact; drept urmare îmbinarea va avea o rezistență mecanică redusă;
- Microîmbinări false - datorate în special inserării defectuoase a terminalelor componentelor (terminale scurte sau îndoite sub componente) MEMS;
- Microîmbinări reci - datorate fie aplicării unei cantități de căldură insuficiente, fie mișcării componentei în timpul solidificării aliajului de îmbinare; defect major de îmbinare, îmbinarea rece este caracterizată de o suprafață cu rugozitate mare.

În figurile 6.28, 6.29, 6.30 și 6.31 sunt prezentate o serie de imperfecțiuni de material ce pot să apară la o microîmbinare eutectică prin lipire cu aliaj .



Figura 6.28 Microîmbinare cu umectare redusă a substratului

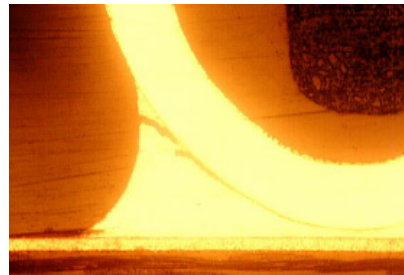


Figura 6.29 Microîmbinare fisurată -stratul format din compușii intermetalici este gros



Figura 6.30 Microîmbinare rece-cauza temperatura insuficientă pentru topirea aliajului

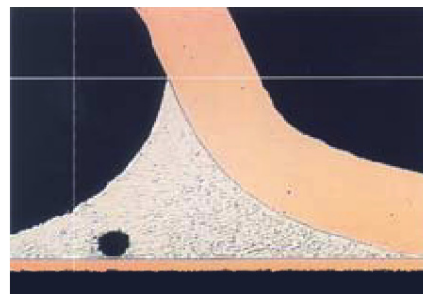


Figura 6.31 Microîmbinare cu goluri în aliajul de lipit

6.5 Concluzii

Analizând structura microîmbinărilor eutectice realizate se pot concluziona următoarele:

- Aliajele de îmbinare utilizate permit derularea procesului și la temperaturi în jurul valorii de 220°C, deci de aproximativ 5 ori mai mici decât temperatura de topire a materialului de bază (cuprul sau argintul);
- Metalul depus are o matrice compusă din Sn; acest fapt este determinat de compoziția chimică a aliajului de lipire eutectică (Sn95,5%);
- Aliajul de microîmbinare eutectică are, de fiecare dată, compoziția eutecticului din sistemul de aliaje din care provine, din acest motiv în îmbinare se regăsește o cantitate mare de eutectic;
- În timpul procesului de microîmbinare au loc procese de difuzie ale principalelor elemente din componența aliajului de lipire, acestea au o intensitate redusă datorită temperaturilor scăzute la care se derulează procesul de microîmbinare eutectică;
- Cuprul difuzat creează instabilități ale structurii și participă la diverse reacții cu celelalte elemente favorizând formarea de eutectic în structura microîmbinării, printre rezultatele acestor reacții este și apariția compușilor intermetalici. La temperatura de 221°C are loc o reacție între Sn și Ag permițând formarea compusului Ag_3Sn , iar la temperatură de 227°C Sn din matrice reacționează cu Cu formându-se astfel un nou compus: Cu_6Sn_5 ;
- Ambii compuși intermetalici formați apar sub formă de mici insule, numărul acestora depinzând de temperatura la care se derulează procesul de microîmbinare, temperaturi mai mari de îmbinare produc cantități mai mari de compuși intermetalici;
- Cantități mari de compuși intermetalici nu sunt de dorit, ei fragilizând microîmbinarea.
- Există două variante de introducere a aliajului de îmbinare posibil a fi aplicate:
 - Depunerea apriorică a aliajului în stare topită pe suprafețele care vor participa la realizarea microîmbinării, urmând ca după punerea în contact a celor două suprafețe acesta din urmă să fie retopit ,
 - Introducerea în stare solidă a aliajului de îmbinare între cele două materiale de bază și topirea sa singulară în timpul procesului de microîmbinare
- Curățarea suprafețelor care participă la procesul de microîmbinare prin șlefuire mecanică urmată de curățare chimică cu diverși solvenți este o etapă extrem de importantă a procesului de microîmbinare. Utilizarea diverselor fluxuri de lipire este, de asemenea, recomandată în special în cazurile în care etapa de curățare mecanică + chimică nu se poate realiza corespunzător.
- Temperatura de topire utilizabilă trebuie să fie cu cel puțin 10-15°C mai mare decât temperatura de topire a aliajului eutectic, pentru a eficientiza procesul de îmbinare.

Rezultatele obținute relevă următoarele caracteristici ale microîmbinărilor eutectice supuse verificărilor:

- Îmbinările prezintă paliere de curgere relativ ample, fapt care se traduce printr-o rupere ductilă, în timp;

- Forțele la care se produc ruperile sunt sensibil mai mari decât forțele maxime care se pot manifesta la nivelul îmbinărilor exploatare în aplicațiile din industria electronică (domeniu căruia îi sunt dedicate majoritatea microîmbinărilor realizate), motiv pentru care riscurile de rupere accidentală sunt practic nule.
- Încercările de duritate evidențiază o scădere sensibilă (cu valori procentuale cuprinse între 70...75%) a durității în secțiune, pornind dinspre materialele de bază către centrul îmbinării.
- Așadar, zona de îmbinare este mai moale decât materialul de bază, fapt care demonstrează existența unui risc minim de rupere fragilă a îmbinării eutectice.
- Ruperea a 30% dintre îmbinările realizate prin depunerea de aliaj de îmbinare numai pe unul dintre materialele de bază a demonstrat faptul că această variantă reduce sensibil rezistența mecanică a îmbinării și poate fi utilizată numai atunci când îmbinării i se impune o singură funcție și anume funcția de conductor electric. În cazul sistemului de îmbinare cercetat, cel cu rezultate multifuncționale, această variantă nu este recomandată.
- Pregătirea materialelor de bază înainte de depunerea aliajului de îmbinare, dar și înainte de derularea efectivă a procesului de îmbinare, este o etapă importantă în tehnologia de îmbinare. Formarea oxizilor la suprafața straturilor depuse sau între stratul depus și materialul de bază reduce sensibil contactul dintre suprafețele respective și în consecință și rezistența mecanică a îmbinărilor.

7. Cercetări asupra procesului de microîmbinare prin topire cu fascicul Laser

La realizarea echipamentelor electrice/electronice este necesară conectarea unor componente prin conexiuni care sunt realizate, de obicei, prin intermediul unor conductori electrici având diametre, în cazul componentelor de tip MEMS, mai mici de 400 μ m. O conexiune electrică poate fi realizată fie între două conductoare, fie între un conductor și o folie.

În general, conexiunile electrice sunt realizate prin lipire, un procedeu de îmbinare având o productivitate relativ redusă. Microîmbinarea cu Laser poate constitui o alternativă avantajoasă atât sub aspect tehnic, cât și economic.

Pornind de la aceste aspecte, sunt derulate experimentări de simulare termică a proceselor de microîmbinare cu fascicul Laser, urmate de experimentări de microîmbinare efectivă a două componente specifice microcontactelor electrice. Materialele de bază utilizate în cadrul acestor experimentări sunt folii și fire din cupru și aluminiu având dimensiunile (grosime și/sau diametru) mai mici de 400 μ m. În cazul simulării procesului de încălzire la îmbinare prin topire cu fascicul Laser, se urmărește modul de comportare a componentelor de micro-contact supuse procesului de încălzire. În componenta microdispozitivelor electromecanice MEMS intră și micromateriale din polimeri care se pot îmbina cu componente metalice utilizând ca procedeu îmbinarea cu fascicul Laser. Din această cauză, este nevoie de conceperea unui dispozitiv Laser pentru microîmbinarea polimerilor.

Sunt efectuate examinări vizuale macroscopice și microscopice ale probelor încălzite, urmărindu-se efectele diversilor parametri tehnologici. În ceea ce privește microîmbinările realizate, acestea sunt caracterizate după cum urmează:

- se determină rezistența electrică a microîmbinării (cele două fire împreună cu îmbinarea realizată între ele) este măsurată și comparată cu rezistența electrică a firelor neîmbinate.
- sunt efectuate examinări macroscopice în scopul evidențierii eventualelor discontinuități ale microîmbinării.
- sunt efectuate examinări microscopice în scopul determinării soluțiilor solide și poziția grăunților cristalini

7.1 Cercetări experimentale a procesului de microîmbinare prin topire cu fascicul Laser a materialelor metalice

Scopul acestui studiu este evidențierea modului în care se comportă componentele cu dimensiuni mai mici decât 400 μ m supuse interacțiunii cu un fascicul Laser în regim pulsant. Se alege regimul pulsant datorită posibilității mai facile de a controla energia introdusă în componentele de îmbinat. Experimentările de încălzire cu Laser sunt derulate la INCD în Sudură și Încercări de Materiale, ISIM Timișoara cu o sursă LASER tip Nd:YAG HL 124 LCU cu caracteristicile tehnice prezentate în tabelul 7.1.

Tabel 7.1 Caracteristicile tehnice ale Laserului tip Nd: YAG HL 124 LCU

SURSA DE FASCICUL LASER		CAP DE SUDARE LASER			POZITIONER	
Tipul	Nd:YAG	Distanța focală	90 mm	Acționare	manuală	
Puterea pulsului	300 W – 5 kW	Apertura	20 mm	Cursa pe verticală	420 mm	
Durata pulsului	0,3 – 20 ms				Cursa pe orizontală	320 mm
Frecvența	300 Hz					
Pmax. fascicul puls	5 kW					

Capul optic de sudare Laser prezentat în figura 7.1 este conectat la sursa Laser printr-un cablu optic cu fibră de sticlă, [41]



Figura 7.1. Cap de îmbinare prin topire cu fascicul Laser [41]

Programul de experimentări cu microîmbinări simulate prin topire cu fascicul Laser este efectuat pe două tipuri de componente: folii din aluminiu îmbinate prin suprapunere, folii din cupru îmbinate prin suprapunere și conductori (fire) din cupru îmbinate cap la cap.

7.1.1 Microîmbinarea prin topire cu fascicul Laser a foliilor din aluminiu

Compoziția chimică, și caracteristicile mecanice ale foliilor de aluminiu utilizate în experimentări sunt prezentate în tabelul 7.2. În tabelul 7.3 sunt prezentați parametri tehnologici specifici procesului de microîmbinare, parametri care sunt utilizați la procesul de microîmbinare cu fascicul Laser a două folii din aluminiu cu grosimi de 500 μm .

Tabel 7.2 Compoziția chimică, și caracteristicile mecanice ale foliilor de aluminiu

MATERIAL	ELEMENTE DE ALIERE [%]					
Aluminiu	Fe	Si	Zn	Cu	Ti	Altele
99,1	0,40	0,30	0,07	0,05	0,05	0,03
CARACTERISTICI MECANICE						
Rm = 60-100 [MPa]		A= 10-20 [%]			E ₀ 70 [GPa]	

Încălzirea se execută în condițiile utilizării unui gaz de protecție, natura gazului de protecție fiind argonul în proporție de 100% , iar debitul gazului de protecție este de 5 l/min

Tabel 7.3 Parametrii de microîmbinare cu fascicul Laser a foliilor din aluminiu

PROBA	DISTANȚĂ FOCALĂ [MM]	DURATĂ PULS [MS]	TENSIUNE [V]	ENERGIE PULS [J]	LAȚIME PĂTRUNDERE [MM]	ÎNĂLȚIME PĂTRUNDERE [MM]
1	5,5	20	400	69,8	1,3	1,0
2	5,25	20	400	70,1	1,31	1,01
3	5,0	20	400	70,2	1,33	1,04
4	4,75	20	400	69,9	1,31	1,01
5	4,5	20	400	70,0	1,31	1,01
6	4,25	20	400	69,8	1,3	1,0
7	4,0	20	400	70,3	1,34	1,23
8	3,75	20	400	70,0	1,31	1,01
9	3,5	20	400	69,1	1,2	0,9
10	3,25	20	400	70,1	1,31	1,01
11	3,0	20	400	70,1	1,32	1,2
12	2,75	20	400	69,9	1,31	1,01
13	2,5	20	400	70,1	1,32	1,2
14	2,25	20	400	72,8	1,5	1,3
15	2,0	20	400	74,2	1,7	1,4
16	2,75	20	400	69,8	1,3	1,0
17	2,75	20	375	63	0,55	0,12
18	2,75	20	350	53,1	0,34	0,09

În figurile 7.2 și 7.3 sunt prezentate imaginile probei 1, respectiv a probei 5.

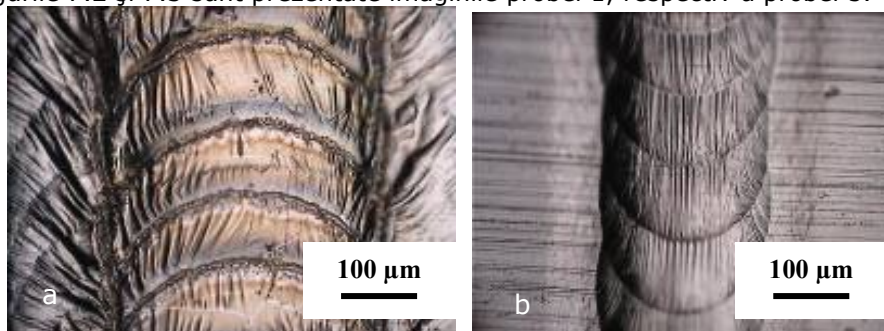


Figura 7.2 Imagini macroscopice corespunzătoare probei 1 : a) suprafața de incidență b) suprafața de ieșire

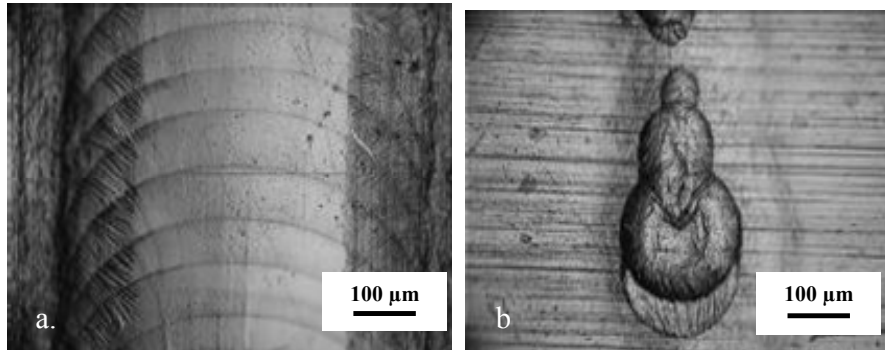


Figura 7.3 Imagini macroscopice necorespunzatoare proba 5: a) suprafața de incidență b) suprafața de ieșire

Îmbinarea probei 1 are o geometrie și un aspect corespunzător atât la suprafața de incidență a fasciculului Laser, cât și la rădăcina microîmbinării, în timp ce la proba 5, pe partea rădăcinii îmbinarea este discontinuă. Discontinuitatea îmbinării la proba 5 poate fi datorată lipsei sau insuficienței gazului de protecție la procesul de îmbinare a componentelor. În interiorul aluminiului lichid se formează pori, iar sursa acestora este hidrogenul, care la temperatura de topire a aluminiului are o solubilitate relativ ridicată. În scopul obținerii unor microîmbinări de înaltă calitate, este foarte importantă pregătirea suprafețelor de îmbinat pentru eliminarea oxizilor. Pentru a elimina formarea defectelor din interiorul cusăturii îmbinate se folosește o protecție cu argon cu 5l/min debit. Rezultatele arată că pătrunderea este influențată în primul rând de distanța fasciculului de focalizare. În figura 7.4 sunt prezentate macrografic pătrunderea în secțiune transversală a două folii din aluminiu îmbinate prin topire cu fascicul Laser

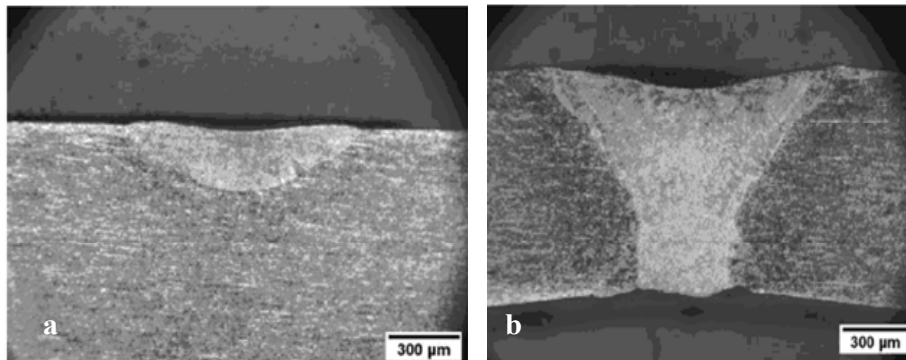


Figura 7.4 Macrografie secțiune transversala imbinare folii aluminiu , proba 2 - pătrundere insuficientă (a) și proba 5- pătrundere corespunzătoare (b)

La probele 1, 2 și 4 materialul nu este pătruns pe deplin din cauza densității de putere mică, dar și din cauza distanței de focalizare a fasciculului. Suprafața de incidență și suprafața de ieșire (rădăcina) la proba 5 se distinge prin rotunjimi. Lățimea suprafeței de trecere a pătrunderii este de 1,336 mm, iar lățimea de ieșire la rădăcina este de 0,872 mm. În figura 7.5 se prezintă imagini cu o microstructură în zona influențată termic (ZIT), și o imagine cu microstructura metalului depus.

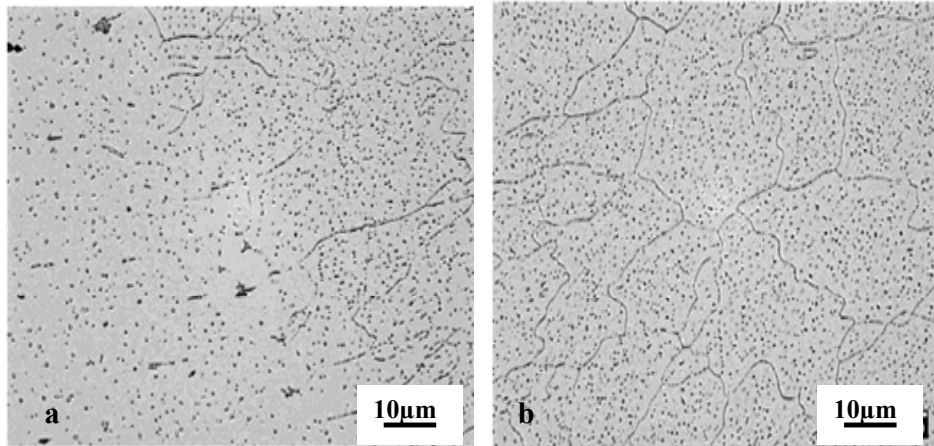


Figura 7.5 Microstructura îmbinare folii aluminu în zona influențată termic (ZIT) (a) și în zona microîmbinării(metal topit)

Se observă o zonă topită de material între zona ZIT și zona îmbinată, existând o trecere lină între ele, iar orientarea dendritelor se poate sesiza în materialul sudat. Microscopia optică este folosită pentru evaluarea pătrunderii îmbinării și pentru măsurarea valorilor microdunităților HV. În figura 7.6 sunt prezentate dependențele dintre energia pulsului și tensiunea excitantă față de geometria pătrunderii.

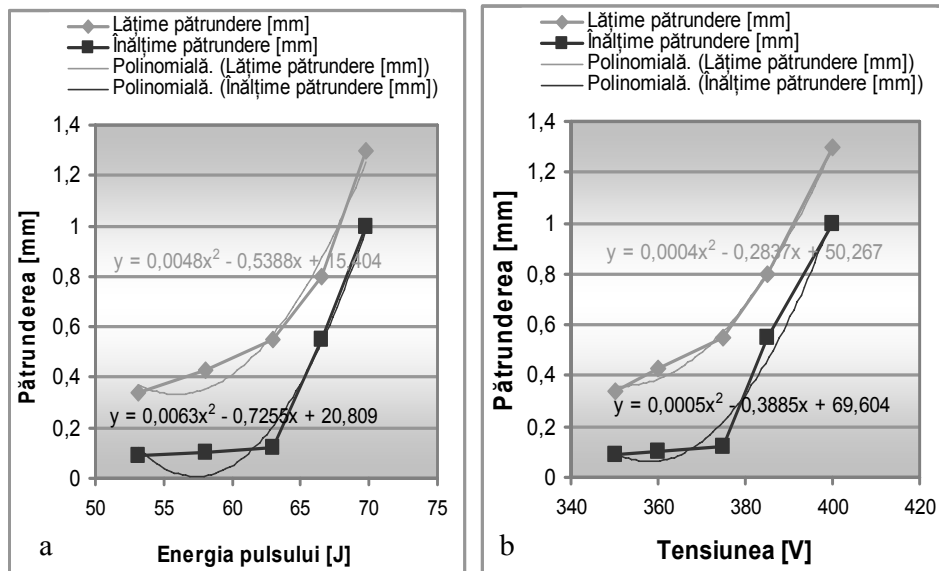


Figura 7.6 Influențele energiei pulsului și tensiunii față de lățimea (a) și înălțimea pătrunderii (b)

Din imaginea din figura 7.8 se calculează regresia statistică a energiei pulsului față de lățimea pătrunderii reprezentată printr-o ecuație polinomială de gradul 2, și față de înălțimea pătrunderii reprezentată printr-o ecuație polinomială de gradul 2.

$$L_p = 0,0048E^2 - 0,5388E + 15,404 \quad (7.1)$$

$$H_p = 0,0063 E^2 - 0,7255E + 20,809 \quad (7.2)$$

Regresia statistică a tensiunii față de lățimea patrunderii și înălțimea patrunderii este calculată printr-o ecuație polinomială de gradul 2.

$$L_p = 0,0004U^2 - 0,2837U + 50,267 \quad (7.3)$$

$$H_p = 0,0005U^2 - 0,3885U + 69,604 \quad (7.4)$$

În care L_p - lățimea pătrunderii, în [mm]; H_p - înălțimea pătrunderii în [mm]; E - energia pulsului [Jouli]; U - tensiunea [V].

Din figurile 7.8 și 7.9 rezultă că valorile pătrunderii geometrice cresc exponențial odată cu creșterea valorilor energiei pulsului și a tensiunii.

În figura 7.7 sunt prezentate influențele distanței focale a fascicului față de geometria pătrunderii.

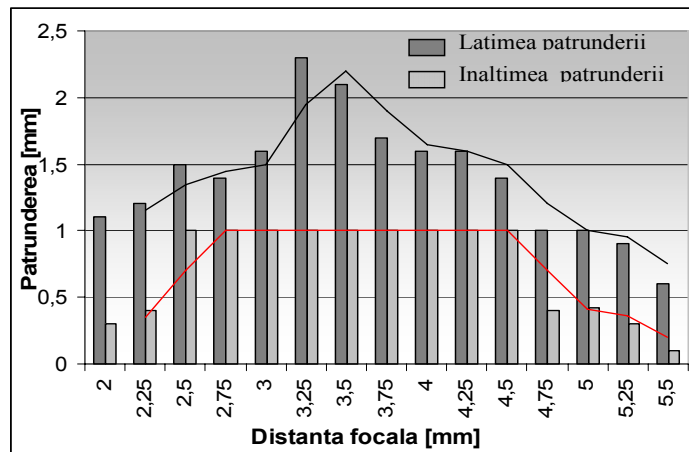


Figura 7.7 Influența distanței focale a fascicului față de geometria pătrunderii

Se observă la imaginea din figura 7.7, cum lățimea pătrunderii în partea superioară a graficului are un punct maxim având valoarea de 2,3 mm, iar distanța focală se desfășoară în valori de la 2 mm la 5,5mm.

Înălțimea pătrunderii are un maxim constant de 8 valori la cifra de 1mm, valorile scad odată cu creșterea distanței de focalizare.

În tabelul 7.4 sunt prezentate valorile microdunităților la probele folii din aluminiu îmbinate prin topire cu fascicul Laser : 5, 9 și 16.

Tabel 7.4 Valorile de microdunitate a foliilor din aluminiu îmbinate cu fascicul Laser

MICRODURITATE HV										
PROBA	MB			ZIT			LT		MS	
16	36	34	34,5	25	23,9	24	26,5	29	30	29
5	36	37	32,5	26	25	24	26	27,5	30	34
9	38	37	40,5	26	28,5	26,5	29	28,5	35,5	28,0

În figura 7.8 este prezentată evoluția microduriților la trei probe amprentate în : MB, ZIT, LT și MS

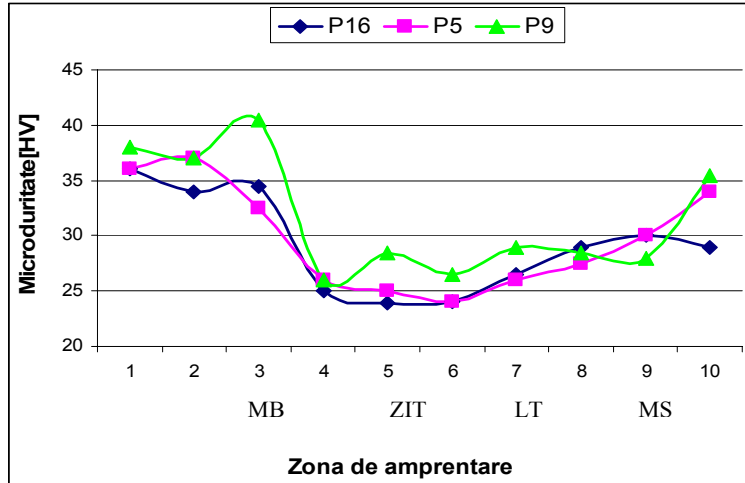


Figura 7.8 Evoluția microduriților în zonele: material de bază (MB), zona influențată termic(ZIT), limita de topire(LT) și materialul sudat (MS)

Microduriția HV s-a efectuat pe probele 5, 9 și 16. Din graficul din figura 7.8 se arată faptul ca cele mai mari valori de microduriți sunt cele de la proba 9. Acest fapt se datorează existenței unui volum de material topit mai mic, iar răcirea se execută mai rapid în componente formându-se structuri fine. În îmbinările din probele 5, 9 și 16, se obțin cele mai mari valori de microduriți existente în materialul de bază(MB). Acest lucru e posibil deoarece aluminiul este laminat la rece. Microduriția în zona influențată termic(ZIT), precum și în materialul de bază(MB) crește. Pe baza rezultatelor macro și microstructurale rezultă că parametrii optimi sunt cei utilizați la proba 5. La această probă se observă cum valorile cu cea mai mare microduriție se regăsesc în materialul de bază(MB). Începând cu zona influențată termic și terminând cu nucleul microîmbinării, valorile microduriților încep să scadă.

La microîmbinarea foliilor din aluminiu cu fascicul Laser se trag următoarele concluzii:

- la îmbinarea foliilor din aluminiu, geometria pătrunderii este influențată de energia pulsului, tensiunea și distanța de focalizare față de componente.
- în cazul microîmbinărilor prin suprapunere a foliilor din aluminiu, oxizii de aluminiu de la suprafață și particulele de oxizi din interiorul materialului sudurii ridică probleme în realizarea unor îmbinări de calitate.
- În cazul foliilor de aluminiu, utilizarea unui gaz de protecție inert (argon) în timpul îmbinării este imperativă. Gazul de protecție elimină pericolul de oxidare a materialului în timpul procesului de îmbinare, respectiv de producere al porilor, asigurând condițiile necesare realizării unor îmbinări sudate corespunzătoare ca aspect și geometrie.
- La probele 1, 2 și 4 materialul nu are pătrundere totală din cauza densității de putere mică, dar și din cauza distanței de focalizare a fasciculului
- Din calculul regresiiilor statistice valorile lățimii pătrunderii crește exponențial cu creșterea energiei pulsului, iar valorile înălțimii pătrunderii crește exponențial cu creșterea energiei pulsului.

- Valorile geometriei pătrunderii cresc exponențial cu creșterea tensiunii.
- Din realizarea microdurităților unei îmbinări a două folii din aluminiu suprapuse rezultă faptul ca valorile cele mai mici se obțin în zona de sudare, ceea ce implică o fragilitate scăzută a îmbinării neexistând riscul de rupere fragilă.

7.1.2 Microîmbinarea prin topire cu fascicul Laser a foliilor din cupru

Foliile din cupru sunt materiale metalice ce sunt utilizate pe scară largă din cauza unei mai bune conductibilități termice și electrice. Compoziția chimică și caracteristicile mecanice și fizice ale cuprului sunt prezentate în tabelul 7.5

Tabel 7.5 Compoziția chimică și caracteristicile mecanice și fizice ale cuprului

Cu	Sn	Pb	Fe	F	Sb	Bi	As	Ni	S
99,4	0,003	0,005	0,019	0,019	0,001	0,0001	0,001	0,001	0,003
Temperatura de topire[°C]		Densitatea [g/cm ³]		Căldura specifică [j/kg °C]		Conductivitate termică[W/m.K]		Rezistența la tracțiune [N/mm]	
1085		9,60		385		391		106,5	

În tabelul 7.6 sunt prezentați parametrii tehnologici specifici procesului de microîmbinare, prin topire cu fascicul Laser a două folii din cupru cu grosimea de 500 μm.[33],[58],[59].

Tabel 7.6. Parametrii de microîmbinare cu fascicul Laser a foliilor din cupru

Număr proba	Putere puls [W]	Durată puls [ms]	Distanța Focală [mm]	Lățime pătrundere	Înălțime pătrundere	Condiții
1	1100	4	5,5	0,34	0,1	Argon
2	1150	5	5,25	0,39	0,1	Argon
3	1200	6	5,0	0,6	0,25	Argon
4	1250	7	4,75	0,8	0,5	Fara gaz
5	1300	8	4,5	1,1	0,8	Argon
6	1600	9	4,25	1,4	1,2	Argon

În figura 7.9 și figura 7.10 sunt prezentate imaginile macrografice ale probei îmbinate 3, respectiv ale probei 4. Îmbinarea 3 este corespunzătoare ca aspect și geometrie atât la suprafața de incidență a fasciculului Laser, cât și la rădăcina microîmbinării.

Sudura este uniformă și prezintă solzii tipici pentru o îmbinare prin topire. Spre deosebire de aceasta, proba 4 prezintă discontinuități, respectiv pori atât la suprafața de incidență a fasciculului Laser, cât și la rădăcina microîmbinării. Aceste imperfecțiuni sunt datorate lipsei protecției de gaz a materialului în timpul îmbinării. Probele 1, 2 și 6 sunt asemănătoare cu proba 1, în timp ce proba 5 prezintă imperfecțiuni de același tip ca și proba 4. Imaginile macroscopice ale probelor realizate prin microîmbinare cu fascicul Laser a foliilor din cupru sunt prezentate în figurile 7.9 și 7.10.

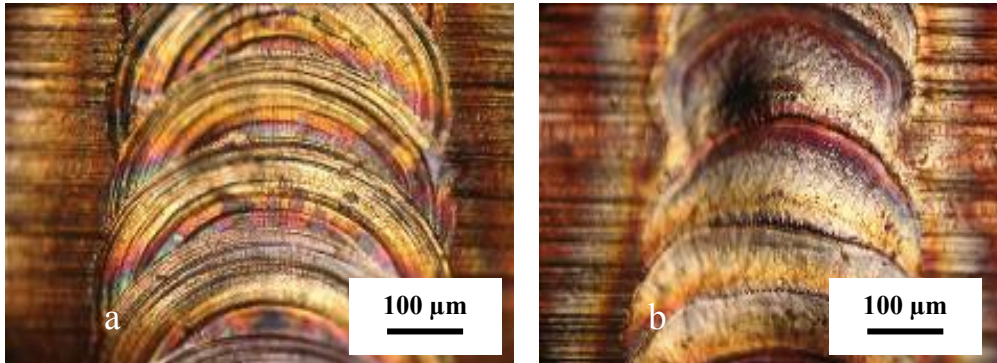


Figura 7.9 Imagini macroscopice proba 3: a) suprafața de incidență b) suprafața de ieșire

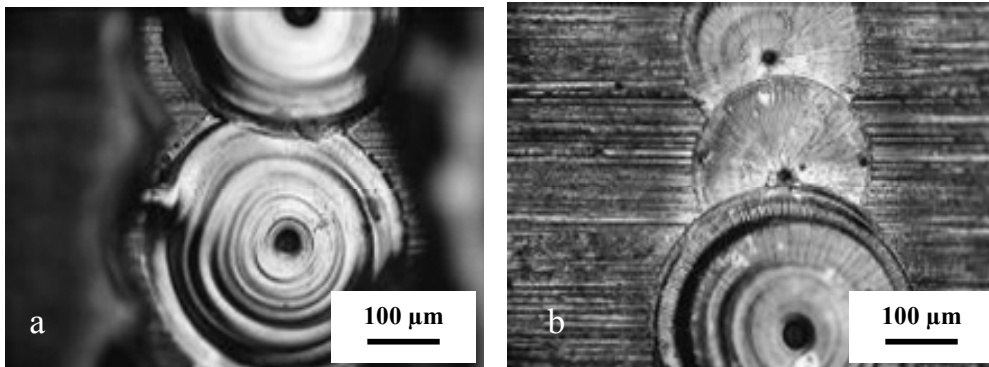


Figura 7.10 Imagini macroscopice proba 4: a) suprafața de incidență b) suprafața de ieșire

În figura 7.11, sunt prezentate imagini cu microstructurile foliilor din cupru, a metalului de bază ce s-a topit precum și ZIT în urma îmbinării cu fascicul Laser. Se pot observa particule de oxizi de cupru Cu_2O , datorate probabil mișcărilor zonei topite, metalul aflat în mișcare reacționând cu moleculele de oxigen rămase în zonă.

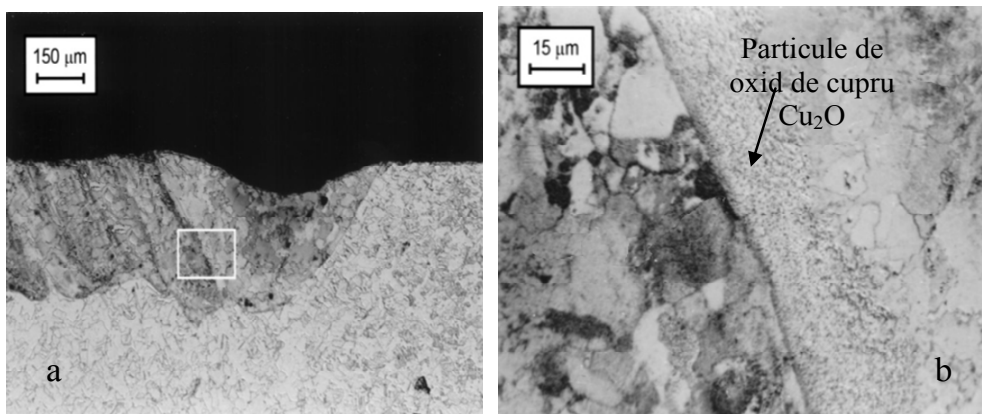


Figura 7.11 Microstructura îmbinare Cu-Cu: MB topit(a) și particule de oxid de cupru(b)

În figura 7.12 (a,b,c) sunt prezentate grafic influențele puterii pulsului, distanței de focalizare și duratei pulsului față de geometria pătrunderii fasciculului Laser.

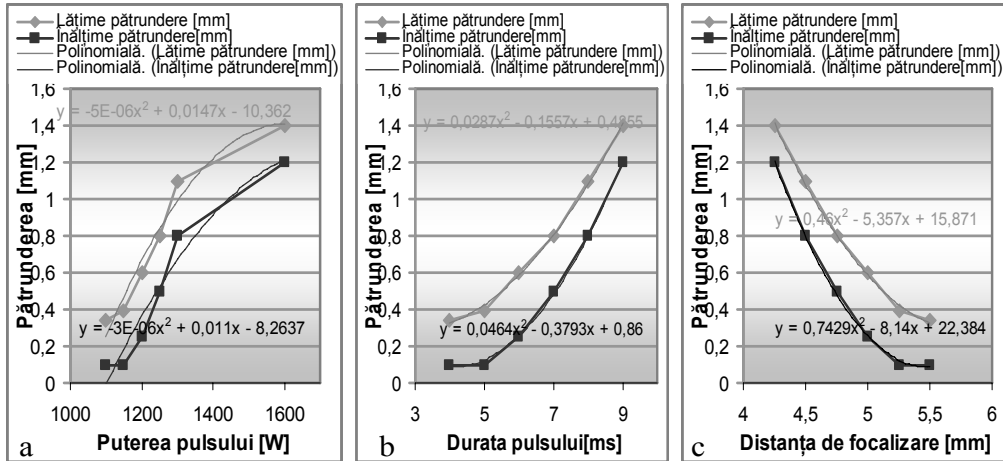


Figura 7.12 Influențele puterii pulsului(a), duratei pulsului(b) și distanței de focalizare (c) față de lățimea și înălțimea pătrunderii

În continuare se prezintă ecuațiile de regresie statistică polinomială de gradul 2 :

$$PL = -5E-06Pp^2 + 0,0147 Pp - 10,362 \quad (7.5)$$

$$HL = -3E-06Pp^2 + 0,011Pp - 8,2637 \quad (7.6)$$

$$PL = 0,0287Dp^2 + 0,1557 Dp + 0,4855 \quad (7.7)$$

$$HL = 0,0464Dp^2 - 0,3793Dp + 0,86 \quad (7.8)$$

$$PL = 0,46Df^2 - 5,357 Df + 15,871 \quad (7.9)$$

$$HL = 0,7429Df^2 - 8,14Df + 22,384 \quad (7.10)$$

În care PL- reprezintă lățimea pătrunderii[mm]; HL - înălțimea pătrunderii [mm]; Pp- puterea pulsului fasciculului [W]; Df- distanța de focalizare [mm] și Dp- durata pulsului [ms]. Din graficul din figura 7.12a se observă că lățimea cât și înălțimea pătrunderii cresc exponențial cu creșterea puterii pulsului de fascicul.

În figura 7.12b, se arată din grafic ca valorile ce compun geometria pătrunderii cresc exponențial o dată cu creșterea valorilor distanței de focalizare. În ultimul grafic din figura 7.12c rezultă că atât lățimea pătrunderii cât și înălțimea pătrunderii cresc exponențial cu creșterea duratei pulsului.

Concluzionând în baza rezultatelor și a observațiilor efectuate în cadrul experimentărilor, se pot considera următoarele:

- în cazul microîmbinării prin suprapunere a foliilor din cupru, oxizii de cupru de la suprafață și particulele de oxizi din interiorul materialului sudurii ridică probleme în realizarea unor îmbinări de calitate.
- în cazul foliilor de cupru utilizarea unui gaz de protecție inert (argon) în timpul îmbinării este imperativă. Gazul de protecție elimină pericolul de oxidare a materialului în timpul procesului de sudare, respectiv de

producere al porilor, asigurând condițiile necesare realizării unor îmbinări sudate corespunzătoare ca aspect și geometrie.

- în cazul microîmbinărilor la foliile din cupru din calculul de regresie statistică rezultă faptul ca geometria pătrunderii crește exponențial cu creșterea parametrilor de îmbinare: puterea pulsului, distanța de focalizare și durata pulsului.

7.1.3 Microîmbinarea prin topire cu fascicul Laser a firelor din cupru

Programul experimental constă în efectuarea unor microîmbinări cap la cap a unor fire din cupru cu diametrul 400 μm . Datorită dimensiunii reduse a componentelor asigurarea poziționării corespunzătoare a acestora în timpul îmbinării devine o problemă critică, fiind necesare măsuri speciale pentru fixarea lor. De aceea, în cadrul experimentărilor s-a utilizat un dispozitiv de prindere și poziționare realizat de doctorand și prezentat schematic în figura 7.13 .

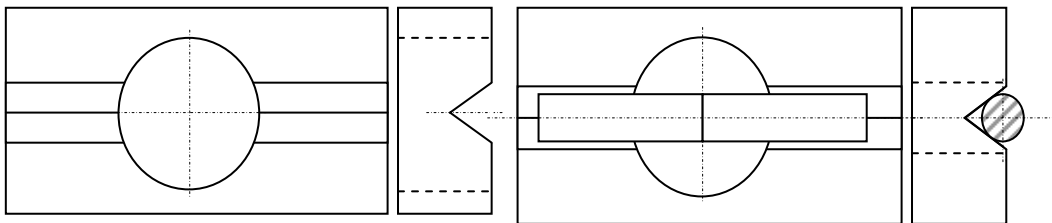


Figura 7.13 Dispozitivul pentru poziționat firele (a) și dispozitivul cu firele montate (b)[78]

Utilizând dispozitivul de aliniere, capetele celor două fire sunt puse în contact conform figurii 7.13. Figura 7.14 "a" prezintă o imagine CCD mărită a celor două componente de îmbinat imediat înaintea aplicării pulsului Laser, iar figura 7.14 "b" prezintă o imagine de ansamblu a celor două fire de îmbinat fixate în vederea microîmbinării deasupra orificiului de trecere a fasciculului Laser.



Figura 7.14 Contactul dintre cele două fire de îmbinat înaintea aplicării pulsului (a), imagine de ansamblu a firelor (b), deasupra orificiului de trecere fasciculului Laser. [78]

Programul experimental de îmbinare cuprinde realizarea a 4 serii de microîmbinări, fiecare dintre acestea fiind compuse din 5 microîmbinări realizate în același regim de îmbinare în scopul evaluării repetabilității procesului de îmbinare pentru un set dat de parametri tehnologici. În tabelul 7.7 sunt prezentați parametri tehnologici utilizați la microîmbinarea firelor din cupru

Tabel 7.7 Parametrii tehnologici utilizați la îmbinarea cu fascicul Laser

Proba	Număr pulsuri	Energie Puls[J]	Durăță Puls[ms]	Putere Puls[W]	R [mΩ]	Rs [mΩ]	$\Delta R/R \cdot 100\%$	B _{ZIT} [mm]
1	1	11	5	2200	25,9	29,5	13,9	0,38
2	1	11	5	2200	24,5	28,4	15,9	
3	1	11	5	2200	24,2	27,9	15,3	
4	1	11	5	2200	23,8	27,4	15,1	
5	1	11	5	2200	24,6	29,5	19,9	
6	1	12	5	2400	24,5	38,4	NA	0,41
7	1	12	5	2400	24,9	28,5	14,4	
8	1	12	5	2400	25,1	29,7	18,3	
9	1	12	5	2400	25,1	29,9	19,1	
10	1	12	5	2400	24,5	33,4	NA	0,42
11	1	9,6	6	1600	22,8	27,4	20,2	
12	1	9,6	6	1600	24,9	28,5	14,4	
13	1	9,6	6	1600	24,7	28,4	15,0	
14	1	9,6	6	1600	23,9	28,5	19,2	
15	1	9,6	6	1600	24,8	28,4	14,5	0,45
16	1	11,2	7	1600	25,2	32,5	NA	
17	1	11,2	7	1600	23,9	29,4	23,0	
18	1	11,2	7	1600	21,9	25,5	16,4	
19	1	11,2	7	1600	25,6	29,2	14,1	
20	1	11,2	7	1600	25,9	28,9	13,9	

În figura 7.15 este prezentat aspectul macroscopic al probelor îmbinate din cele 4 serii de microîmbinări cu regimul de îmbinare prestabilit din tabelul 7.8.

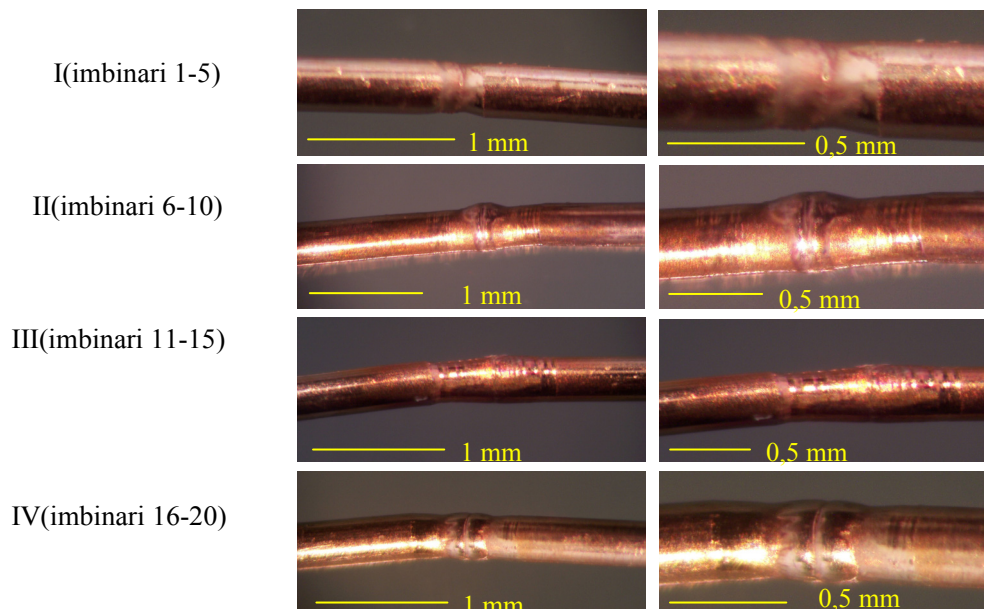


Figura 7.15 Probe fire cupru îmbinate prin topire cu fascicul Laser

Rezultatele măsurătorilor de rezistență electrică sunt realizate conform standardului SR EN 50383:2011 prin metoda celor două sonde prezentată la caietul 6 și sunt indicate în tabelul 7.8. În tabel s-au făcut următoarele notații:

R - rezistența electrică a sârmei neîmbinate (material de bază),

Rs- rezistența electrică a firelor îmbinate,

B ZIT - lățimea zonei influențate termic.

Așa cum rezultă din figura 7.15, la microîmbinarea macroscopică I se observă o lipsă de material depus în zona de îmbinare. La microîmbinarea II din figură se observă că există un surplus de material depus în zona îmbinării.

Microîmbinările macroscopice III și IV au un aspect corespunzător fără imperfecțiuni de formă sau suprafață. Având în vedere faptul că îmbinările sudate se utilizează ca elemente de circuit electric este necesar ca acestea să aibă o rezistență electrică cât mai redusă. De aceea, ca indicator al calității îmbinărilor sudate se realizează o creștere relativă a rezistenței electrice a conductorului ca urmare a procesului de îmbinare.

Acest indicator s-a definit prin compararea rezistenței electrice a unei îmbinări sudate de o lungime dată cu rezistența electrică a materialului de bază (fir din cupru) de aceeași lungime. În același timp, este evaluată și dimensiunea zonei influențate termic prin procesul de sudare (lățimea ZIT). Valorile lățimii ZIT sunt cuprinse între 0,38...0,45 mm, deci de același ordin cu diametrul sârmelor îmbinate.

Valorile obținute la încercarea de rezistență electrică pentru cele 20 probe îmbinate sunt ilustrate în figura 7.16.

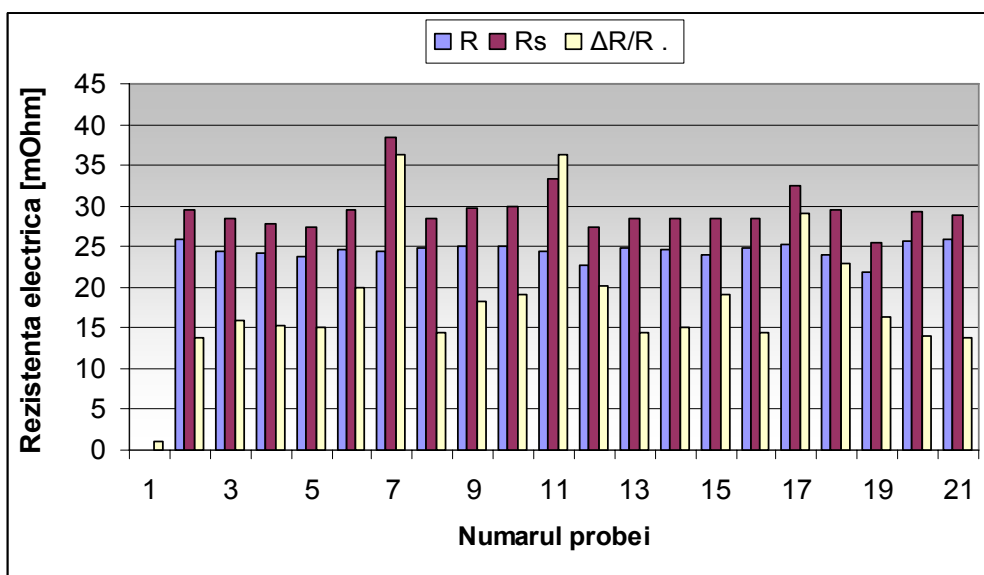


Figura 7.16 Rezistențele electrice ale îmbinărilor obținute prin topire cu fascicul Laser

Din grupul primelor cinci microîmbinări (I) rezistența electrică de contact cu cea mai mică valoare este de 27,4 mΩ. La următoarele cinci microîmbinări (II), valoarea cea mai mică de rezistență electrică de contact este de 28,5 mΩ, în grupul III de îmbinări 27,4 mΩ este valoarea cea mai mică a rezistenței electrice de contact. La ultimul grup de microîmbinări (IV), rezistența electrică a probei sudate

cu valoarea cea mai mică este de 25,5 mΩ. Această rezistență electrică a firelor din cupru îmbinate cu fasciculul Laser din setul de îmbinări e considerată valoarea optimă, având ca parametri de îmbinare: energia pulsului-11,2 J, durata pulsului - 7 ms și puterea pulsului-1600 W. La probele îmbinate nr.6, 10 și 16 se obțin valorile cele mai ridicate ale rezistențelor electrice de contact cu valorile: 38,4, 33,4 și 32,5. Aceste valori eronate sunt obținute din cauza discontinuităților în zona de îmbinare a firelor, materialul adiacent în zona de îmbinare nu s-a topit suficient, rezultând între cele două fire un contact imperfect și atunci pierderile de curent sunt mari făcând ca rezistența electrică de contact să fie mare și necorespunzătoare pentru un circuit electronic.

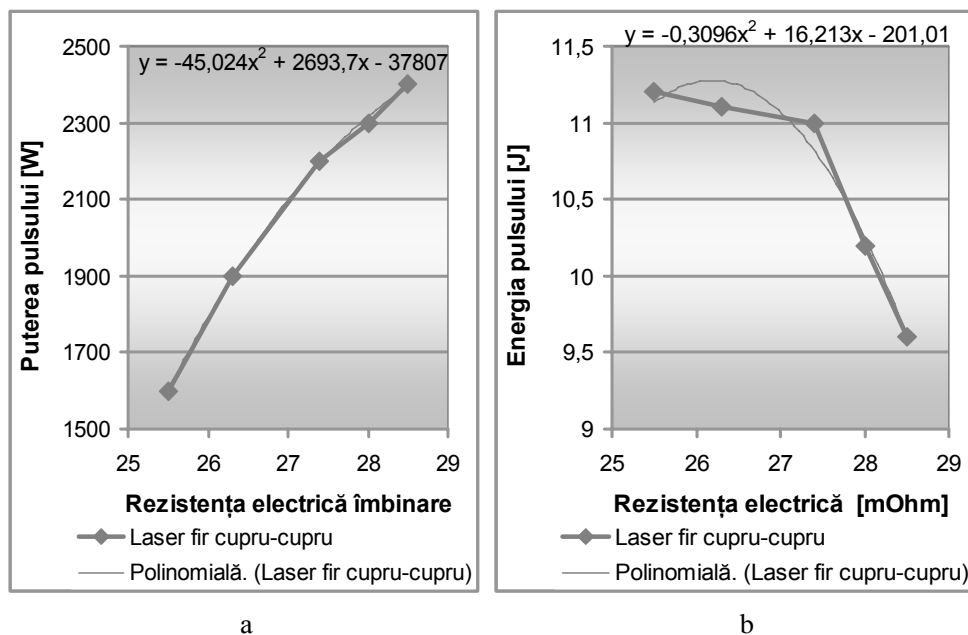


Figura 7.17 Dependențele rezistenței electrice de contact în funcție de:
a) puterea pulsului și b) energia pulsului

Se efectuează o regresie statistică la aceste dependențe obținându-se două ecuații polinomiale:

$$P_p = -45,024 R_s^2 + 2693,7 R_s - 37807 \quad (7.11)$$

$$E_p = -0,3096 R_s^2 + 16,213 R_s - 201,01 \quad (7.12)$$

În care P_p - puterea pulsului în[W], E_p - energia pulsului [Jouli] și R_s -Rezistența electrică de contact a îmbinării[mOhm]. În figura 7.18 se realizează un experiment factorial în care se modifică parametrii energie puls, durată puls și putere puls, observându-se influența acestui set de parametri asupra lățimii ZIT. Ordinea influențării, conform observațiilor efectuate în timpul experimentărilor este durata pulsului, energia pulsului și puterea pulsului

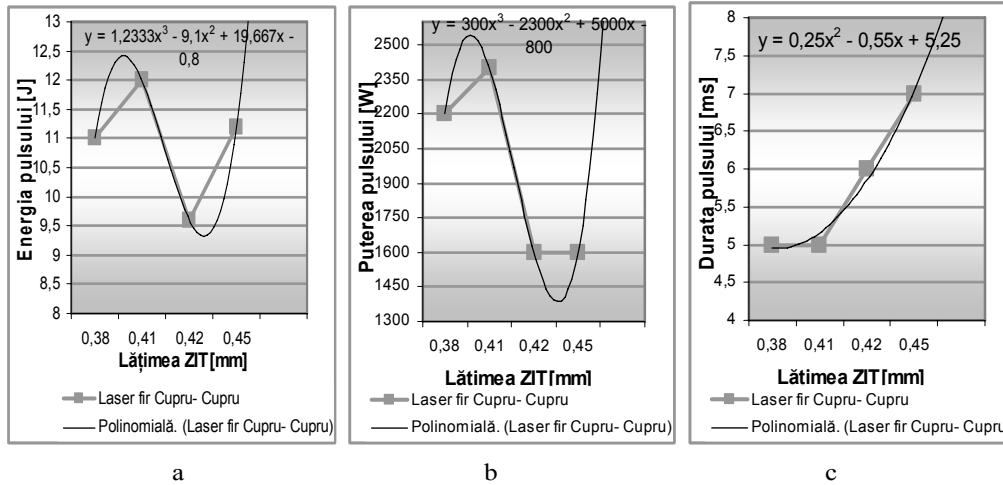


Figura 7.18 Dependențele lățimii zonei de influență termică în funcție de: a) energia pulsului, b) puterea pulsului și c) durata pulsului

Se efectuează o regresie statistică la aceste dependențe obținându-se trei ecuații polinomiale:

$$E_p = 1,2333B^3 - 9,1B^2 + 19,667B - 0,8 \quad (7.13)$$

$$P_p = 300B^3 - 2300B^2 + 5000B - 800 \quad (7.14)$$

$$D_p = 0,25B^2 - 0,55B + 5,25 \quad (7.15)$$

În care: E_p -Energia pulsului [Jouli], P_p - Puterea pulsului [W] și D_p -Durata pulsului [ms]

În concluzie, studiile teoretice și experimentările de îmbinare a conductorilor din cupru au evidențiat următoarele aspecte:

- Considerând că rezistența mecanică a microîmbinării este un criteriu secundar de analiză a îmbinării de tip contact electric, dat prin faptul ca asupra contactului nu acționează forțe importante, nu se consideră oportună efectuarea unor verificări privind nivelul caracteristicilor mecanice ale microîmbinării.
- La realizarea probelor, datorită riscului de oxidare a cuprului la temperatura de îmbinare este necesară asigurarea unui mediu inert în care să se deruleze procesul de microîmbinare.
- Zonele influențate termic ale îmbinărilor au dimensiuni comparabile cu diametrul sârmei supuse sudării.
- Microîmbinările destinate conexiunilor electrice sunt caracterizate de o rezistență electrică redusă, valoarea maximă a creșterii rezistenței de contact, înregistrată, este de 9 mΩ.
- Se poate observa, de asemenea, faptul ca rezistența electrică crește cu 3-5 mΩ datorită microîmbinării, fapt care evidențiază o bună comportare, din acest punct de vedere, a procedurii de microîmbinare prin topire cu fascicul Laser .
- Din calculul de regresie statistica reiese faptul că, rezistența electrică de contact este dependentă de puterea pulsului și de energia pulsului

- Din calculul de regresie rezultă că lățimea zonei influențate termic depinde de parametrii de microîmbinare : energia pulsului, puterea pulsului și durata pulsului.

7.2 Cercetări experimentale ale procesului de microîmbinare prin topire cu fascicul Laser a materialelor polimerice

Microîmbinarea polimerilor este la rândul ei o componentă importantă din cadrul proceselor de fabricare a MEMS. Orice MEMS are cel puțin o componentă confecționată din polimeri specializați: capsula. Această stare de fapt presupune necesitatea dezvoltării de tehnologii și echipamente dedicate îmbinării acestor componente polimerice ale MEMS. În continuare sunt prezentate etapele principale ale proiectării unui astfel de dispozitiv.

7.2.1 Conceperea unui cap de microîmbinare cu Laser-diodă

Procesele moderne de microîmbinare a polimerilor [34], utilizează fasciculul Laser ca sursă de încălzire fiind nevoie de o putere relativ redusă și dependentă de grosimea componentei supuse procesului de microîmbinare și un punct focal cu diametru mic. Un astfel de dispozitiv este propus în continuare, schema bloc împreună cu circuitul de alimentare a diodei Laser fiind prezentate în figura 7.19 .

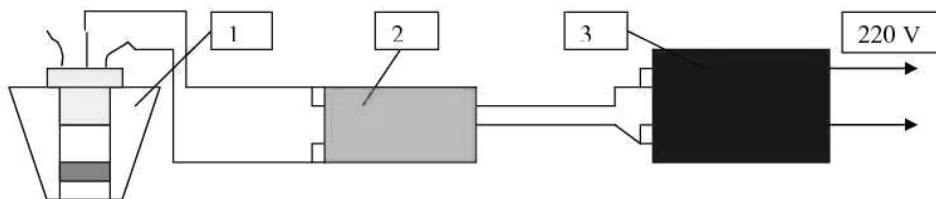


Figura 7.19 Schema bloc cu circuitul de alimentare a unei diode Laser
1-Cap cu diodă Laser, 2- Circuit de stabilizare, 3- Sursa stabilizată de curent continuu [73]

În capul de sudare (1) se montează o diodă Laser, aceasta având o capacitate de cel puțin 50 mW, putere necesară pentru microîmbinarea foliilor polimerice cu grosimi de ordinul a 100-200 μm ; în partea inferioară a capului este fixată o lentilă concentratoare. Pentru ca dioda Laser să funcționeze în parametrii prestabiliți, între sursa de curent și capul diodei Laser, se interpune un circuit de stabilizare și control al alimentării (2).

Acest circuit de stabilizare este conectat la o sursă de tensiune stabilizată (3). Utilizând o astfel de sursă este posibilă prescrierea intensității curentului de alimentare (mA) și tensiunea la bornele diodei (mV). Circuitul de stabilizare a tensiunii de alimentare a diodei Laser are la bază un regulator clasic de tensiune.

Dioda Laser utilizată este un dispozitiv în care mediul activ este un semiconductor similar cu cel existent într-o diodă ce emite lumină (figura 7.20), cu excepția ca, până la un anumit curent prin semiconductor, lumina este coerentă. Dioda propusă pentru dispozitivul de microîmbinare este o diodă de tip Laser SLD [40] ale cărei caracteristici sunt: tensiunea de alimentare $U = 2,5 - 2,8 \text{ V}$, reglabilă pentru puterea dorită a fasciculului Laser și curentul maxim de lucru la 85 mA, iar schema de alimentare este prezentată în figura 7.21.

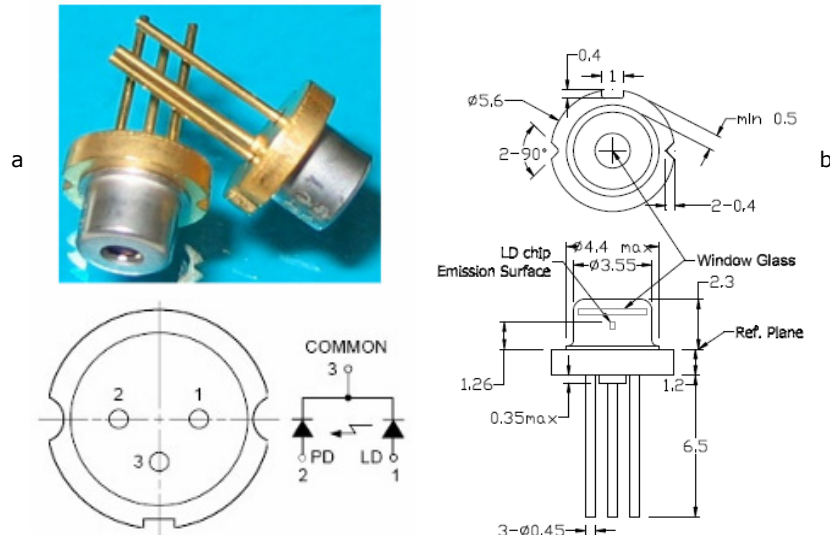


Figura 7.20 Dioda Laser (vedere de sus) (a); vedere laterală(b)[73]

Pentru a preveni deteriorarea prematură a diodei Laser SLD curentul de lucru al sursei de putere este stabilit la 25 mA. În figura 7.22 este prezentat capul Laser realizat. În partea din față a capului, culoarea neagră este considerată în vederea creșterii eficienței emisiei de lumină.

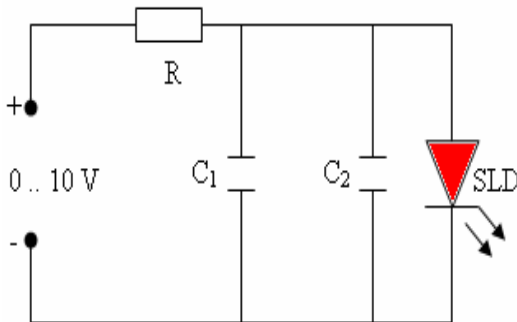


Figura 7.21 Schema de alimentare a capului LASER $R = 100 \Omega$, $C_1 = 10 \mu F$, $C_2 = 0.01 Mf$



Figura 7.22 Capul LASER proiectat și realizat pentru microîmbinarea foliilor[20]

7.2.2 Experimentări cu capul de îmbinare Laser-diodă

Programul experimental de microîmbinare urmărește în primul rând testarea funcționalității dispozitivului de îmbinare realizat. Pentru experimentări sunt utilizate folii din polipropilenă transparente și mate (culoare neagră) cu grosimea de $30 \mu m$ și, respectiv, $170 \mu m$.

- a. În prima etapă experimentală se efectuează încercări de încălzire/topire a materialului sub acțiunea fasciculului Laser la diferite valori ale puterii acestuia. Parametrii de îmbinare utilizați sunt prezentați în tabelul 7.8.

Tabel 7.8 Parametrii folosiți pentru verificarea foliilor termoplastice

Număr test	Transparența	Grosimea [μm]	Parametrii Diodei Laser		Distanța Focală [mm]	Durată puls [ms]	Lățime pătrunderii [μm]	Înălțime pătrunderii [μm]	Unghi incidență α [$^\circ$]
			Tensiune U [V]	Curent I [mA]					
1	Ridicată	30	1,2	25	20	5	200	2	90
				50			500	5	
				75			700	10	
2	Scăzută	170	1,2	25	20	5	300	40	90
				50			500	80	
				75			1200	170	

În figura 7.23 sunt ilustrate imaginile suprafețelor materialelor polimerice după acțiunea fasciculului Laser

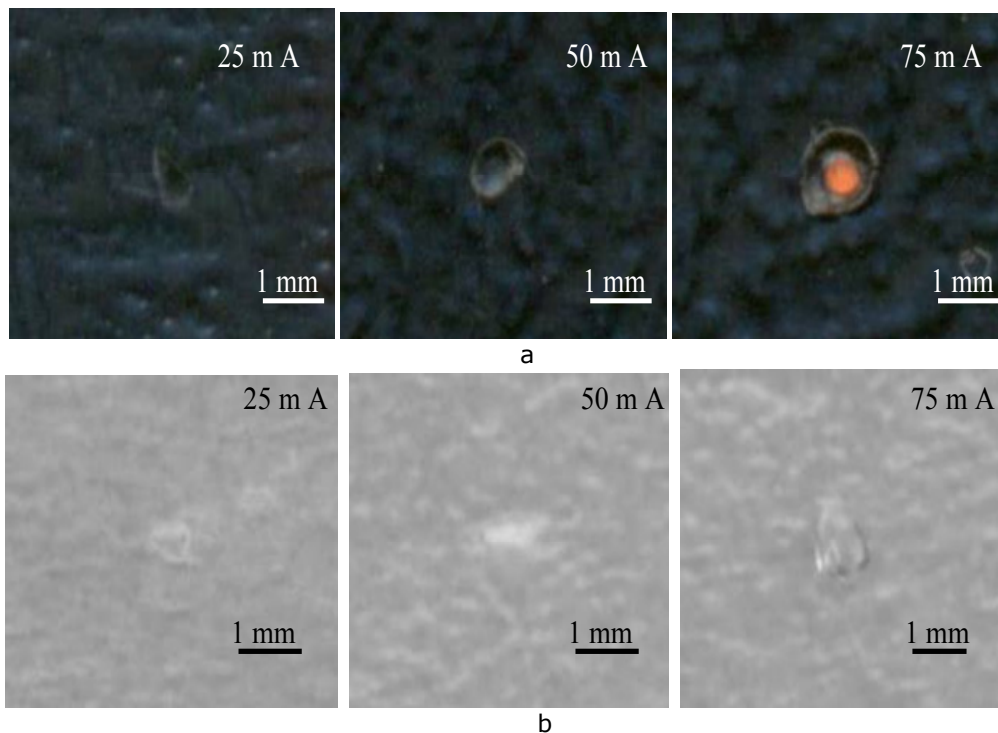


Figura 7.23 Imagine macrografică a zonei încălzite de fasciculul Laser pentru diverși curenți prin diodă: a) polimer opac și b) polimer transparent

În figura 7.24 sunt prezentate dependențele curentului unei diode Laser asupra geometriei pătrunderii (lățimea și înălțimea pătrunderii) la un cuplu de polimeri cu transparența ridicată

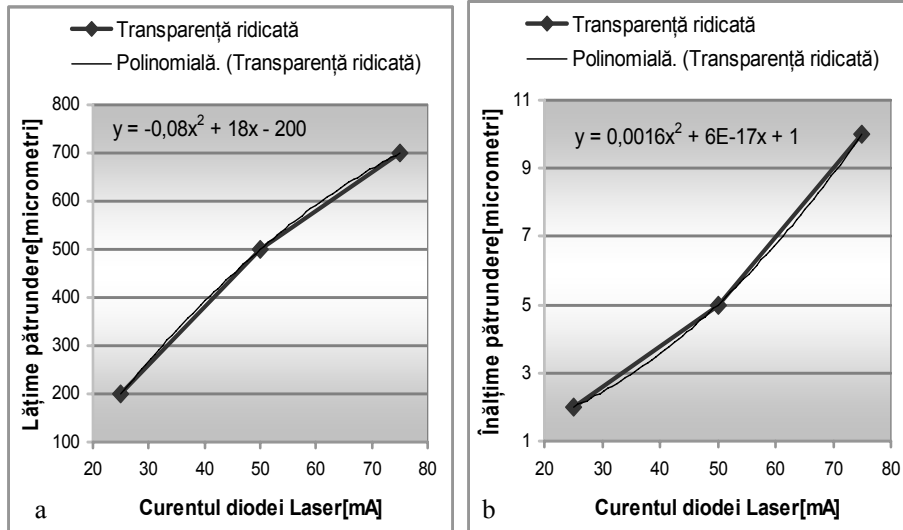


Figura 7.24 Influențele intensității de curent asupra lățimii (a) și înălțimii pătrunderii (b) la o simulare de topire a polimerilor cu transparență ridicată (mată)

În figura 7.25 sunt prezentate influențele curentului unei diode Laser asupra geometriei pătrunderii (lățimea și înălțimea pătrunderii) la un cuplu de polimeri cu transparență scăzută.

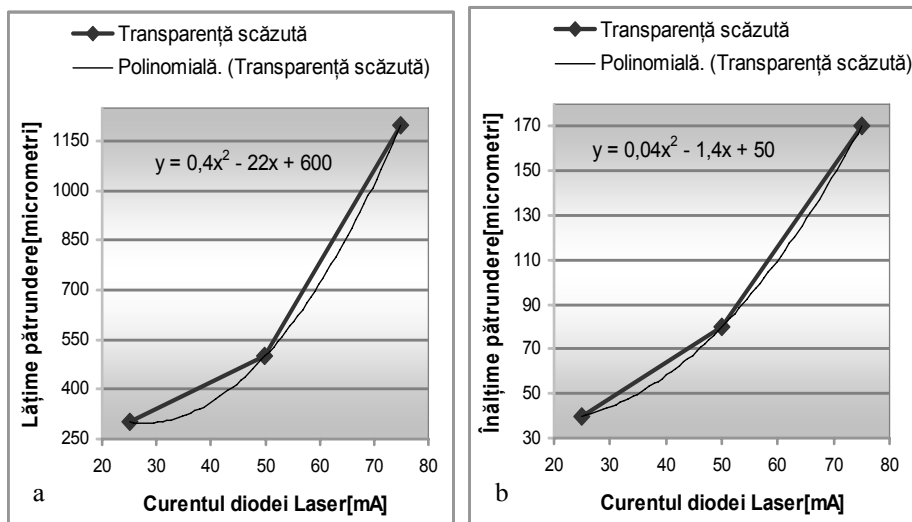


Figura 7.25 Influențele intensității de curent asupra lățimii(a) și înălțimii pătrunderii(b) la o simulare de topire a polimerilor cu transparență scăzută (opacă)

Se calculează ecuațiile de regresie statistică a lățimii și înălțimii pătrunderii în funcție de curentul diodei Laser. Ecuațiile sunt de formă polinomială de gradul 2 și sunt scrise sub forma:

$$\text{Transparență ridicată : } L_p = -0,08 I^2 + 18 I - 200 \quad (7.16)$$

$$\text{Transparență ridicată : } H_p = 0,0016 I^2 + 6E - 17 I + 1 \quad (7.17)$$

$$\text{Transparență scăzută : } L_p = 0,4 I^2 - 22I + 600 \quad (7.18)$$

$$\text{Transparență scăzută : } H_p = 0,04 I^2 - 1,4 I + 50 \quad (7.19)$$

În care : L_p - Lățimea pătrunderii [microni], H_p - Înălțimea pătrunderii [microni], și I - Intensitatea curentului la o diodă Laser [mA]

În timpul experimentărilor de încălzire (topire) cu fascicul Laser rezultă următoarele observații:

- transparența polimerului cauzează o absorbție scăzută a fasciculului Laser, așa încât se produce o încălzire redusă a materialului de bază; un material de bază opac este mai puternic încălzit;
 - pentru a produce un efect termic este necesar în ambele cazuri un curent cu o intensitate de peste 50 mA
 - la un curent de 75 mA, ceea ce corespunde unei puteri a laserului de 90 mW, materialul se încălzește și se topește pe o suprafață cu un diametru de cca. 1-2 mm
 - în general, zona topită are formă circulară, există însă posibilitatea modificării formei zonei topite prin modificarea unghiului de incidență a razei Laser pe suprafață
 - La simularea de topire a polimerilor cu transparentă ridicată și transparentă scăzută se constată că geometria pătrunderii fasciculului Laser, depinde foarte mult de intensitatea curentului din dioda Laser
- b. Etapa a doua a programului experimental urmărește realizarea unor microîmbinări prin suprapunere între două folii polimerice. Acestea sunt fixate prin utilizarea unei măști speciale (figura 7.26).

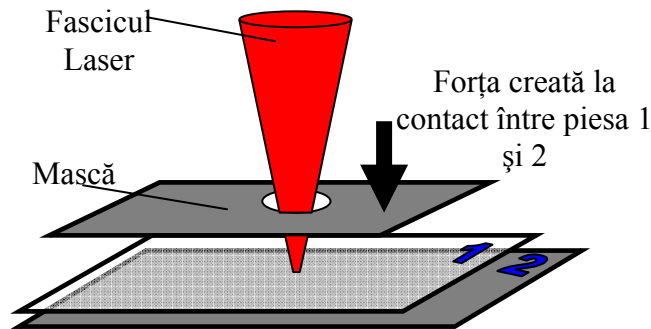


Figura 7.26. Sistemul de microîmbinare cu fascicul Laser a polimerilor

În cadrul experimentărilor se testează diferite combinații de materiale de bază (polimeri) și anume:

- polimer cu transparentă ridicată cu polimer cu transparentă scăzută
- polimer cu transparentă scăzută cu polimer cu transparentă scăzută
- polimer cu transparentă ridicată cu polimer cu transparentă ridicată.

La prima combinație de materiale polimerice pentru creșterea eficienței procesului de încălzire materialul transparent este poziționat deasupra celui opac.

Parametrii utilizați în experimentări sunt prezentați în tabelul 7.9.

Tabel 7.9 Parametrii utilizați la microîmbinarea foliilor din polimer

Probă	Transparența	Grosimea [μm]	Parametrii Diodă Laser		Distanța focala [mm]	Lățime pătrundere [μm]	Înălțime pătrundere	Unghi incidentă α [$^\circ$]
			Tensiune U[V]	Curent I[mA]				
1	1: Ridicată	1: 30	1,2	50	20	20	70	90
2	2: Scăzută	2: 170		75		40	200	
3	1: Scăzută	1: 170	1,2	50	20	70	100	90
4	2: Scăzută	2: 170		75		150	300	
5	1: Ridicată	1: 30	1,2	50	20	0	0	90
6	2: Ridicată	2: 30		75		0	0	

Aspectul microîmbinărilor cu materiale polimerice realizate este prezentat în figura 7.27.

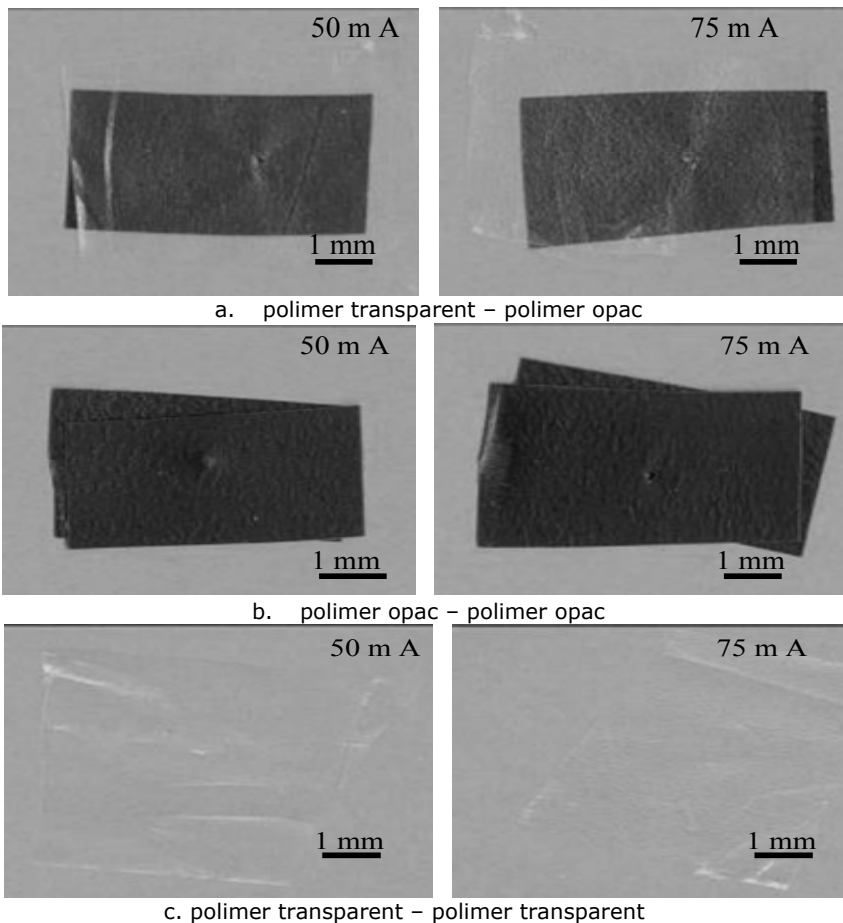


Figura 7.27 Microîmbinarea cu fascicul Laser a foliilor din polimer

În figurile 7.28 și 7.29 sunt prezentate statistic influențele intensității curentului la o diodă Laser în funcție de lățimea și înălțimea pătrunderii la microîmbinări de tipul: polimer transparent – polimer opac și polimer opac - polimer opac.

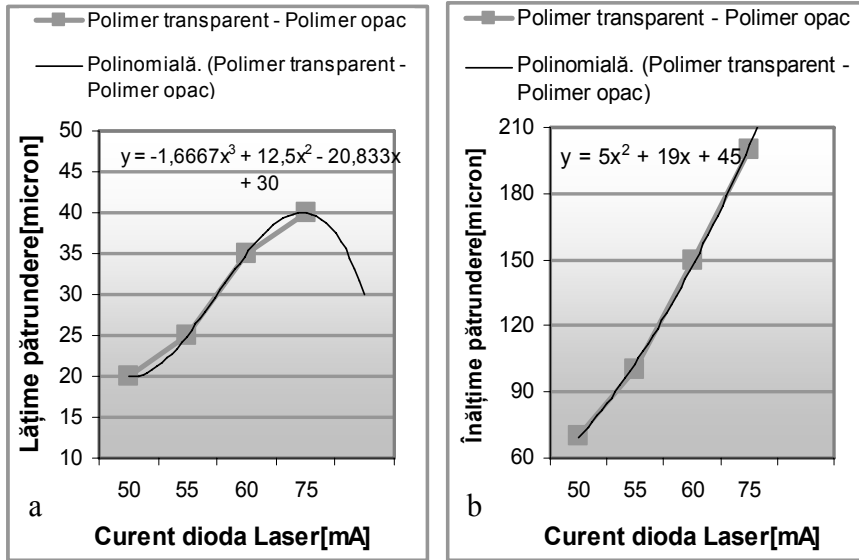


Figura 7.28 Influențele intensității de curent asupra lățimii (a) și înălțimii pătrunderii(b) la o microîmbinare: polimer transparent - polimer opac

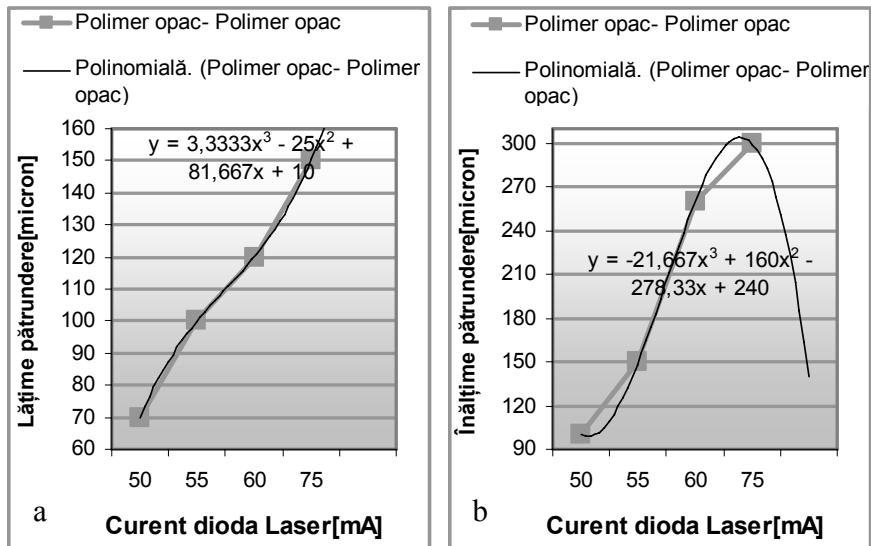


Figura 7.29 Influențele intensității de curent asupra lățimii (a) și înălțimii pătrunderii (b) la o microîmbinare: polimer opac - polimer opac

Ecuatiile polinomiale sunt prezentate astfel:

$$\text{Polimer mat- Polimer opac : } L_p = -1,666 I^3 + 12,5 I^2 - 20,833 I + 30 \quad (7.20)$$

$$\text{Polimer mat- Polimer opac : } H_p = 5 I^2 + 19 I + 45 \quad (7.21)$$

$$\text{Polimer opac - Polimer opac: } L_p = 3,3333I^3 - 25 I^2 + 81,667I + 10 \quad (7.22)$$

$$\text{Polimer opac - Polimer opac: } H_p = -21,667 I^3 + 160 I^2 - 278,33I + 240 \quad (7.23)$$

În care: L_p - Lățimea pătrunderii [microni], H_p - Înălțimea pătrunderii[microni], și I - Intensitatea curentului la o diodă Laser [mA]

În urma experimentărilor rezultă următoarele concluzii:

Pentru configurația **polimer transparent – polimer opac** (fasciculul Laser incident pe polimerul transparent)

- se realizează o îmbinare prin sudare a celor două folii în ambele regimuri de sudare
- la curentul de 75 mA se produce însă o perforare a materialului polimeric datorită puterii excesive a fasciculului Laser
- rezistența microîmbinărilor este relativ bună, în ambele regimuri de sudare ruperea îmbinării la încercarea de debutonare producându-se în materialul de bază (polimer)

Pentru configurația: **polimer opac – polimer opac**:

- pentru realizarea unei îmbinări este necesar un curent de 75 mA, la un curent sub această valoare neproducându-se o legătură între cele două folii de polimer
- ca și în configurația precedentă microîmbinarea are o rezistență mecanică bună; sunt efectuate încercări de debutonare a îmbinărilor, iar ruperea se produce în materialele de bază

Pentru configurația: **polimer transparent – polimer transparent** nu se poate realiza o îmbinare sudată în regimurile testate.

În urma realizării capului de sudare cu diodă Laser și a efectuării experimentărilor de microîmbinare a polimerilor se pot sintetiza următoarele concluzii:

1. O diodă Laser poate fi folosită ca o sursă de încălzire pentru microîmbinarea a două folii subțiri polimerice;
2. Foliile transparente sunt slab absorbante de radiație Laser și astfel o putere mai mică este transferată către materialul de bază; din această cauză procesul de microîmbinare este dificil de derulat.
3. Pentru a asigura o absorbție a radiației Laser este necesar ca cel puțin una dintre componente să fie opacă.
4. În cazul în care o componentă este transparentă și una opacă se recomandă ca folia transparentă să fie poziționată în poziție superioară, între capul de sudare și folia opacă;
5. În toate cazurile în care a fost obținută o microîmbinare, rezistența mecanică s-a dovedit a fi foarte bună;
6. În cazul microîmbinărilor: polimer transparent - polimer opac, și polimer opac-polimer opac intensitatea de curent a diodei Laser influențează atât lățimea pătrunderii cât și înălțimea pătrunderii. Trebuie menționat că la utilizarea diodei Laser nu este posibilă o creștere a curentului într-un domeniu larg. Astfel, spre exemplu, în cazul diodei utilizate la o valoare a curentului ce depășește 85 mA, radiația emisă pierde caracteristica de coerență, caracteristică esențială pentru o prelucrare termică.

8.Cercetări asupra procesului de microîmbinare termosonică

Microîmbinarea termosonică este un proces aplicabil atât metalelor, cât și nemetalelor din componența microdispozitivelor MEMS, [38]. Fie că este vorba despre îmbinări ale elementelor conductoare electrice, fie că este vorba despre îmbinările capsulei, procesul de îmbinare termosonică se poate aplica eficient și facil. Calitatea microîmbinărilor realizate prin acest procedeu este dependentă de parametrii tehnologici și de condițiile de mediu în care se derulează procesul. Programul experimental are drept scop identificarea influenței parametrilor tehnologici asupra calității microîmbinărilor realizate, astfel încât să se creeze o bază de informații pentru dezvoltarea acestui proces.

8.1 Procesul de microîmbinare termosonică a metalelor neferoase specifice confecționării microdispozitivelor MEMS

Îmbinările metalelor din cadrul unui MEMS, care pot fi realizate prin procedeul de microîmbinare termosonică, vizează de obicei conexiunile electrice și realizarea formei anumitor elemente cum ar fi consolele deplasabile sub influența câmpurilor electromagnetice. Din acest motiv, uzual, materialele de bază îmbinate sunt de forma sârmelor sau a foliilor. În ceea ce privește natura acestor materiale de bază, cel mai des întâlnite sunt cuprul, aluminiul, diverse clase din familia oțelurilor, precum și metalele nobile de tipul aurului, argintului și platinei.

În programul experimental efectuat la Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale ISIM Timișoara s-a utilizat o instalație cu ultrasunete (figura 8.1 a) având următoarele caracteristici funcționale:

- Tensiunea de alimentare 220 V / 50 Hz
- Frecvența de lucru 20kHz (15kHz,35kHz,40kHz,70kHz)
- Generator de ultrasunete în tehnica PWM
- Puterea maximă 3000 W
- Transductor cu generator piezoceramic
- Reglaj parametrii tehnologici în tehnică digitală
- Amplitudine 0 – 10 μm
- Memorare program tehnologic DA
- Acționare echipament electropneumatic

Ca sursă termică complementară celei cu ultrasunete pentru realizarea procesului hibrid de microîmbinare termosonică s-a utilizat o suflantă cu jet de aer cald, figura 8.1 b.

Pentru a asigura o deformare a materialului în zona de îmbinare, favorabilă pentru asigurarea calității îmbinării, atât sonotroda, cât și nicovala sunt amprentate.

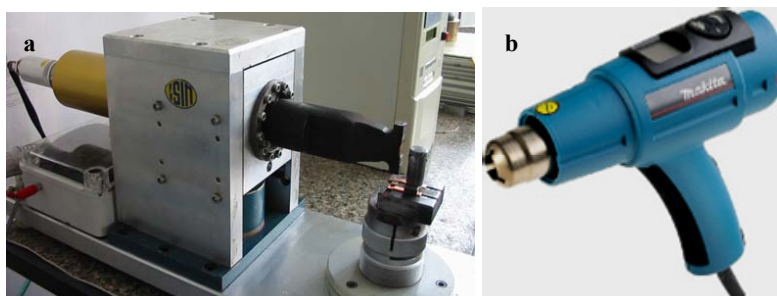


Figura 8.1 Instalație de sudare cu ultrasunete (a), termodispozitiv cu aer cald (b).

Profilul de amprentare al sonotrodei este prezentat în figura 8.2a, acesta având amprente longitudinale, iar profilul de amprentare al nicovalei, cu amprente de tip carioaj, este prezentat în figura 8.2b. Parametrii tehnologici de microîmbinare pot varia în funcție de natura materialelor de bază și de dimensiunile componentelor de îmbinat în următoarele domenii: forța de îmbinare 400-1500 N, timpul de microîmbinare 0,010 -12 s, frecvența ultrasunetelor 20-200 kHz, timpul de menținere după îmbinare 0,3 - 6 s, și amplitudinea oscilației ultrasonore 0 - 10 μm .

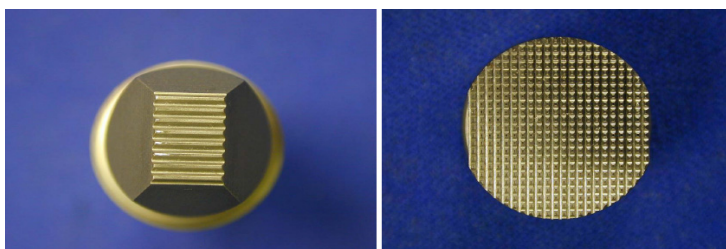


Figura 8.2 Profilul de amprentare (a) sonotrodă, (b) nicovală [15]

În ceea ce privește materialele de bază utilizate la experimentări acestea sunt: cuprul și aluminiul. Componentele de bază sunt de tipul foliilor având grosimi de 200 μm (foliile din cupru) și de 60 μm (foliile din aluminiu). Sunt efectuate microîmbinări cupru-cupru, aluminiu-aluminiu și cupru-aluminiu, prin suprapunere în puncte, pentru fiecare dintre aceste cupluri variindu-se parametrii tehnologici cu influența pregnantă și observându-se influența acestora asupra caracteristicilor și calității microîmbinărilor realizate. În cazul îmbinărilor disimilare materialele de bază sunt așezate în fiecare dintre cele două poziții posibile: cuprul în poziția superioară și aluminiul în poziția inferioară și viceversa. În analiza ulterioară a îmbinărilor se poate considera numai situația în care cuprul se află sub jetul de aer cald, aceasta fiind varianta cu cele mai bune performanțe ale microîmbinării. În tabelele 8.1, 8.2 și 8.3 sunt indicați parametrii tehnologici utilizați la îmbinarea foliilor din cupru, din aluminiu și la îmbinările disimilare cupru-aluminiu. Pentru evidențierea caracteristicilor și a calității îmbinărilor sunt efectuate examinări vizuale macroscopice și microscopice, încercări de tracțiune și măsurări ale rezistenței electrice ale îmbinării, ultima încercare fiind dedicată caracterizării funcționale a îmbinărilor.

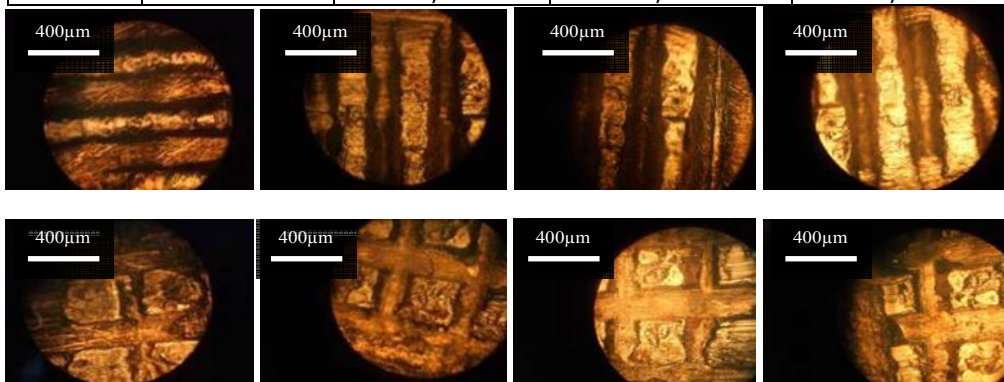
8.1.1 Caracterizarea morfo-structurală a microîmbinărilor

În figurile 8.3, 8.4 și 8.5 sunt prezentate macrografiile îmbinărilor cupru-cupru,

cupru – aluminu și aluminu-aluminu realizate la diferite temperaturi de preîncălzire. Examinarea metalografică este executată conform SR 5000 -1997.

Tabel 8.1 Probe microîmbinare termosonică cupru-cupru(200 μ m/200 μ m)

Sursa termică	Temperatura preîncălzire [°C]	Timp activare Ultrasunete [s]	Amplitudine [μ m]	Presiunea [N/mm ²]
Aercald	50	0,2	6,5	0,14
Aercald	100	0,2	6,6	0,14
Aercald	150	0,2	6,7	0,14
Aercald	200	0,2	6,9	0,14

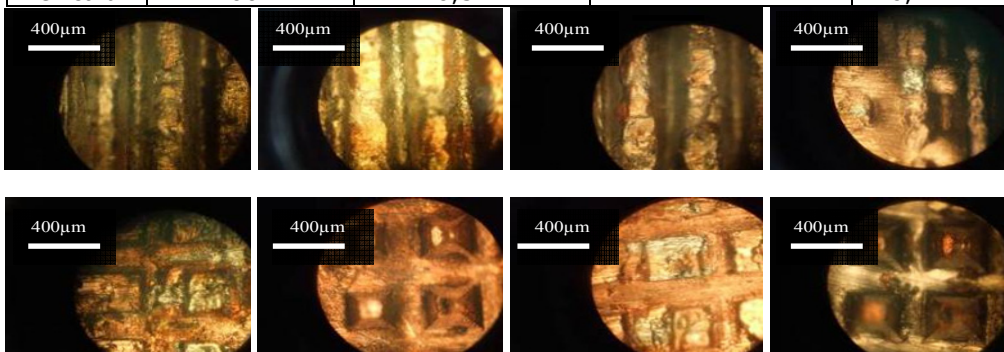


a. 50°C b. 100°C c. 150°C d. 200°C

Figura 8.3 Imagini macrografice ale microîmbinărilor cupru-cupru realizate prin procedeul termosonic, utilizând diverse temperaturi de preîncălzire

Tabel 8.2 Probe microîmbinare termosonică Cupru-Aluminu(200 μ m/60 μ m)

Sursa termică	Temperatura Preîncălzire [°C]	Timp activare Ultrasunet [s]	Amplitudine [μ m]	Presiunea [N/mm ²]
Aer cald	50	0,2	7	0,1
Aer cald	100	0,3	7	0,1
Aer cald	150	0,4	7	0,1
Aer cald	200	0,5	7	0,1

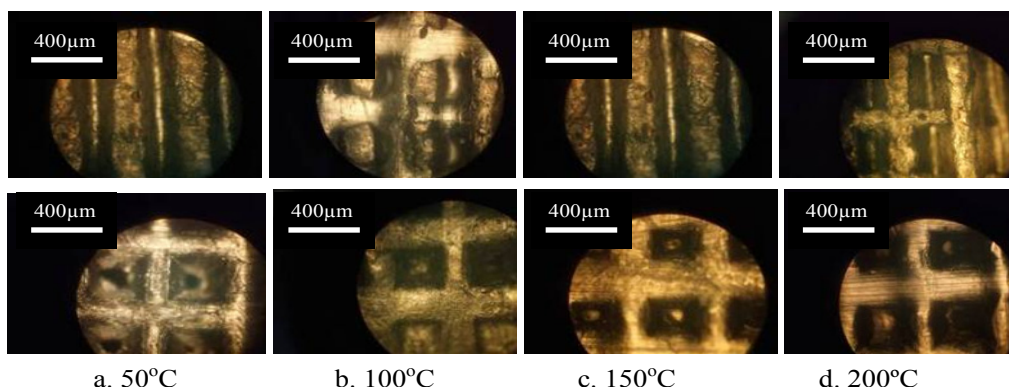


a. 50°C b. 100°C c. 150°C d. 200°C

Figura 8.4 Imagini macrografice ale microîmbinărilor cupru-aluminu realizate prin procedeul termosonic, utilizând diverse temperaturi de preîncălzire

Tabel 8.3 Probe microîmbinare termosonică aluminiu-aluminiu(60 μ m/60 μ m)

Sursa termica	Temperatura preîncălzire [°C]	Timp activare Ultrasunete [s]	Amplitudine [μ m]	Presiunea [N/mm ²]
Aer-cald	50	0,1	7	0,14
Aer cald	100	0,1	7	0,14
Aer cald	150	0,1	7	0,14
Aer cald	200	0,1	7	0,14



a. 50°C b. 100°C c. 150°C d. 200°C
 Figura 8.5 Imagini macrografice ale microîmbinărilor aluminiu-aluminiu realizate prin procedeul termosonic, utilizând diverse temperaturi de preîncălzire

În timpul derulării experimentărilor de microîmbinare sunt observate următoarele influențe:

- Utilizarea unei forțe de apăsare prea mari conduce la străpungerea materialului de bază superior, fenomenul fiind cu atât mai accentuat cu cât materialul de bază respectiv este mai moale (aluminiu); comparativ cu îmbinarea cu ultrasunete fenomenul de străpungere este facilitat și de încălzirea suplimentară cu jet de aer cald.
- Forma amprentelor la fiecare dintre îmbinările realizate prezintă o continuitate superioară celei întâlnite la îmbinarea cu ultrasunete, fenomen pus pe seama înmuierii suplimentare a materialelor de bază sub acțiunea jetului de aer cald. Adâncimea de amprentare crește odată cu creșterea temperaturii de preîncălzire. Din acest motiv este posibilă reducerea forței de apăsare utilizată în procesul de microîmbinare
- La microîmbinarea cuprului cu aluminiul, datorită diferenței dintre caracteristicile de plasticitate ale celor două, se observă faptul că varianta optimă de preîncălzire este cea prin care jetul de aer cald este orientat către componenta din cupru. Aceasta fiind mai dură și mai elastică decât componenta din aluminiu, la preîncălzire își modifică plasticitatea în sensul apropierii din punct de vedere al comportării reologice de comportarea aluminiului.

Probele îmbinate sunt supuse și examinării microscopice pentru o evaluare suplimentară a calității structurii acestora. Rezultatele examinărilor microstructurale sunt cuprinse în figura 8.6(a,b,c), figura 8.7 (a,b,c) și fig.8.8 (a,b,c)

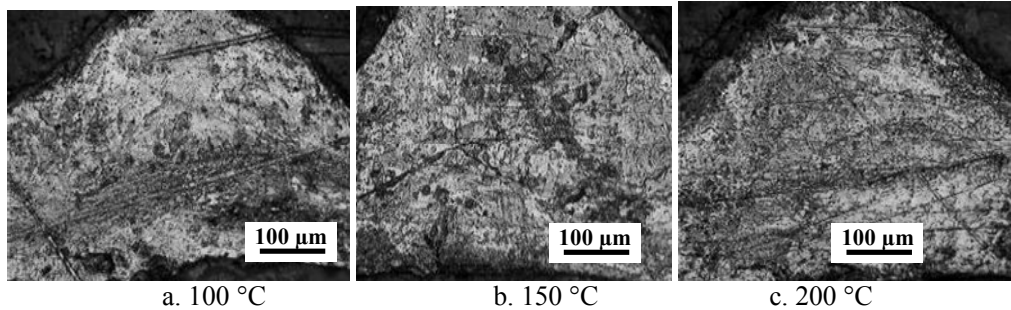


Figura 8.6 Imagini micrografice ale microîmbinărilor cupru-cupru realizate prin procedeul termosonic, utilizând diverse temperaturi de preîncălzire

În urma examinărilor, la imbinarea cupru-cupru este evidențiată o structură de tipul soluției solide Cu- α având incluziuni sferice izolate de Cu_2O pentru materialul de bază și o structură de tipul soluției solide Cu- α pentru zona de imbinare.

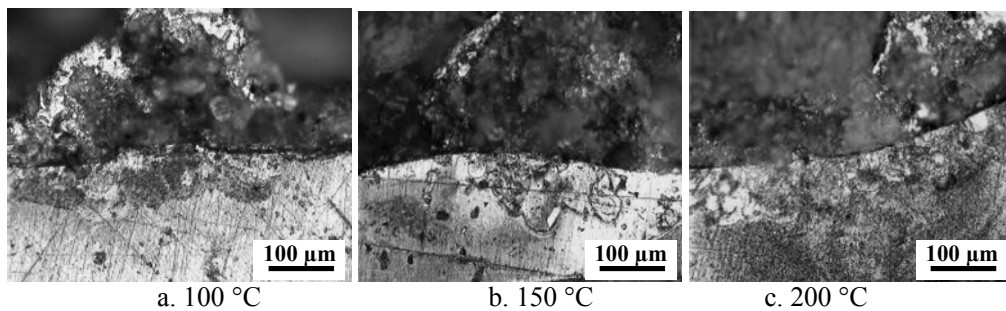


Figura 8.7 Imagini micrografice ale microîmbinărilor cupru-aluminiu realizate prin procedeul termosonic, utilizând diverse temperaturi de preîncălzire

La imbinarea cupru-aluminiu este evidențiată o structură de tipul soluției solide Cu- α și soluție solidă Al- β pentru materialul de bază, iar pentru zona de imbinare faza principală cu compuși intermetalici în microîmbinare s-a dovedit a fi faza Al_2Cu .

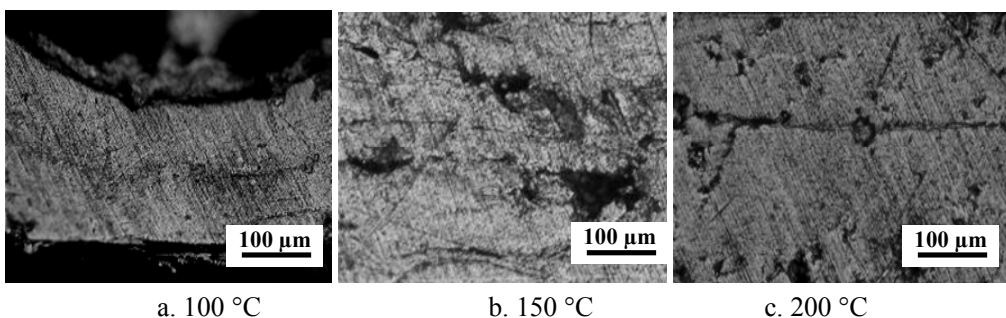


Figura 8.8 Imagini micrografice ale microîmbinărilor aluminiu-aluminiu realizate prin procedeul termosonic, utilizând diverse temperaturi de preîncălzire

La îmbinarea aluminiu-aluminiu este evidențiată o structură de tipul soluției solide Al- α pentru materialul de bază, iar pentru zona de îmbinare faza principală cu compuși intermetalici în microîmbinare s-a dovedit a fi faza Al_2O_3 .

8.1.2 Determinarea caracteristicilor mecanice ale probelor

Pentru determinarea principalelor caracteristici de rezistență ale microîmbinărilor termosonice probele sunt supuse unor încercări de tracțiune.

Echipamentul utilizat pentru încercare este o mașină universală de încercare mecanică de tip TC100-A009, prezentată în figura 7.36.

Dimensiunile foliilor utilizate în experimentare sunt: 100 x 10 x 0,23/0,1mm, figura 8.9. Timpul de activare cu ultrasunete este de 0,4 s pentru fiecare probă în parte, activarea făcându-se la diverse temperaturi de preîncălzire: 100°C, 150°C și 200°C.

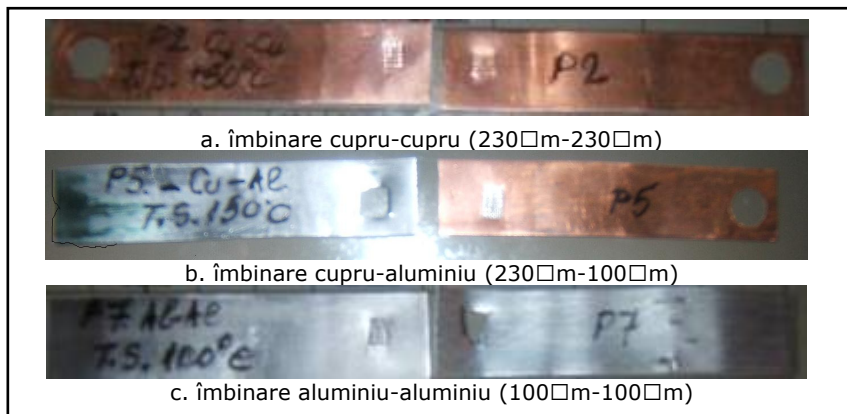


Figura 8.9 Imagini macrografice ale tipurilor de microîmbinări

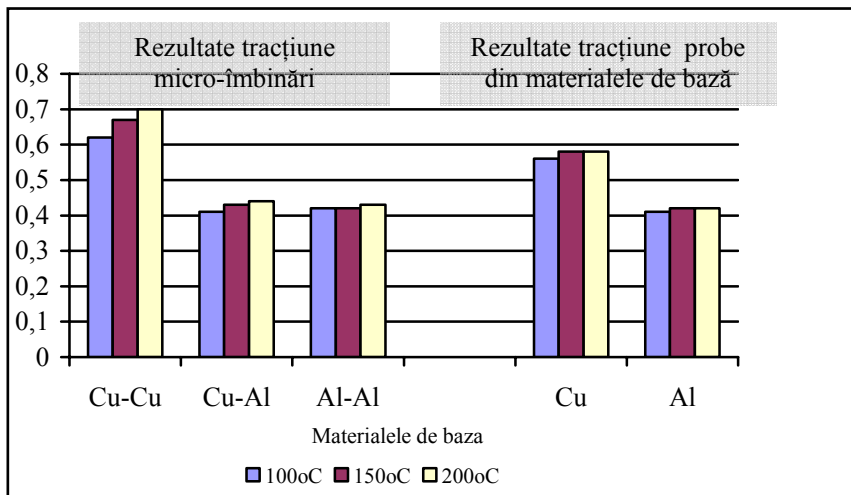


Figura 8.10 Forța de rupere a microîmbinărilor realizate și a probelor prelevate din materialele de bază

Rezultatele obținute la încercarea de tracțiune sunt ilustrate în figura 8.10. Din cele 9 probe supuse încercării la tracțiune, 6 se rup în materialul de bază și 3

se desprind la valori ale forței de rupere relativ reduse, ceea ce poate fi explicat printr-o pregătire necorespunzătoare a suprafețelor de îmbinat. Rezultatele obținute la încercarea de tracțiune a microîmbinărilor sunt comparate cu rezultatele încercării materialelor de bază, Cu și Al, prezentate separat în figura 8.8. Forța de rupere se află în domeniul 0,400...0,600 kN, valoare relativ mare comparativ cu forțele care s-ar putea manifesta în circuitele electronice cărora le sunt destinate îmbinările.

Microîmbinarea este realizată prin deformarea materialelor de bază, prin amprentarea lor de către sonotrodă și nicovală, gradul de deformare fiind de 20...30%.

În urma analizării rezultatelor încercării de tracțiune se desprind următoarele concluzii:

- Din punct de vedere al rezistenței mecanice, probele rupându-se în materialul de bază, se concluzionează faptul ca îmbinarea este mai rezistentă decât materialele de bază; diferența dintre rezistența îmbinării și rezistența fiecărui material de bază este sensibil mai mare în cazul cuplurilor de materiale cupru-aluminiu și aluminiu –aluminiu;
- Utilizarea unor temperaturi de îmbinare joase impune utilizarea unor forțe de apăsare de valori mari, datorită faptului că materialele amprentate nu sunt suficient de plastice la temperaturile de preîncălzire joase. Această observație din timpul experimentărilor a permis ca la utilizarea unor temperaturi de îmbinare ridicate să se folosească forțe de apăsare de valori relativ mici.
- Una dintre observațiile importante efectuate în cadrul experimentărilor este faptul că cele mai bune rezultate sunt obținute atunci când jetul de aer cald este orientat pe materialul cel mai puțin plastic (cuprul), așadar, în cazul îmbinărilor cupru-aluminiu se recomandă ca jetul de aer cald să nu fie poziționat pe folia din aluminiu.

8.1.3 Determinări ale rezistențelor electrice la microîmbinările termosonice

Pregătirea probelor și derularea măsurărilor rezistenței electrice se execută în condițiile specificate la punctul 6.1.3.4.

În cazul probelor microîmbinate termosonic contactarea se face la capătul liber al foilelor, dinspre zona de contact, așa cum este prezentat în figura 8.11, [76].

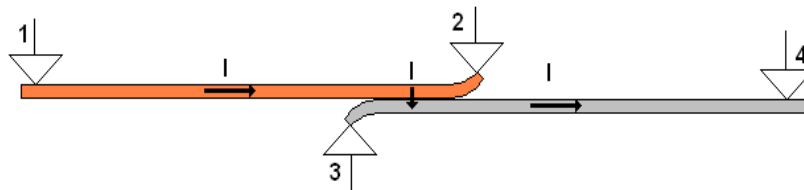


Figura 8.11 Modul de conectare al electrozilor 2 și 3 în cazul probei de Cu – Al cu îmbinare termosonică.[76]

Se menționează faptul că în cazul contactului Cu – Al se alege determinarea în ambele sensuri a curentului pentru a compensa efectul termoelectric produs între cele două materiale.

Pentru fiecare probă se folosesc două valori ale curentului, motivele sunt următoarele:

- să se obțină mai multe puncte experimentale în care să se calculeze valoarea rezistenței electrice
- să se observe eventualele abateri de la liniaritate curent – tensiune
- să se detecteze eventualele dependențe ale rezistenței de contact de valoarea curentului

La curenți de injecție mai mari tensiunea electrică pe contact este mai mare, ceea ce face ca eroarea relativă de citire a tensiunii electrice (și deci eroarea relativă a determinării rezistenței electrice) să scadă.

Lipirea electrozilor (fire de Cu) pe Cupru se execută folosind pastă de fludor, iar lipirea pe aluminiu folosind rășină cu argint coloidal. În tabelul 8.4 sunt prezentate valorile obținute ale rezistențelor electrice de contact în funcție de temperatura de proces și lungimea între punctele de măsurare a probelor obținute prin microîmbinări termosonice

Tabel 8.4 Măsurări rezistențe electrice de contact probe microîmbinări termosonice

Cuplul materiale de bază	Sursa termică	Temperatura proces [°C]	Lungime eșantion [mm]	Rezistența Electrică [mΩ]
Cu-Cu	Aer cald	50	105	1,52
Cu-Cu	Aer cald	50	35	0,57
Cu-Cu	Aer cald	100	105	1,47
Cu-Cu	Aer cald	100	25	0,41
Cu-Cu	Aer cald	150	105	1,41
Cu-Cu	Aer cald	150	30	0,5
Cu-Cu	Aer cald	200	105	1,52
Cu-Cu	Aer cald	200	35	0,57
Al-Cu	Aer cald	100	105	3,1
Al-Cu	Aer cald	100	24	0,71
Al-Cu	Aer cald	200	105	2,81
Al-Cu	Aer cald	200	30	1,09
Al-Al	Aer cald	50	105	4,94
Al-Al	Aer cald	50	23	1,33
Al-Al	Aer cald	100	105	4,8
Al-Al	Aer cald	100	22	0,92
Al-Al	Aer cald	150	105	4,69
Al-Al	Aer cald	150	25	0,97
Al-Al	Aer cald	200	105	5,01
Al-Al	Aer cald	200	25	1,21

Rezultatele obținute sunt prelucrate prin calcul de regresie statistică. În figura 8.12, sunt prezentate modelele matematice parametrice ale rezistenței electrice a îmbinărilor în funcție de temperatura procesului de microîmbinare termosonică pentru diferite cupluri de materiale: cupru-cupru, aluminiu-aluminiu și cupru-aluminiu.

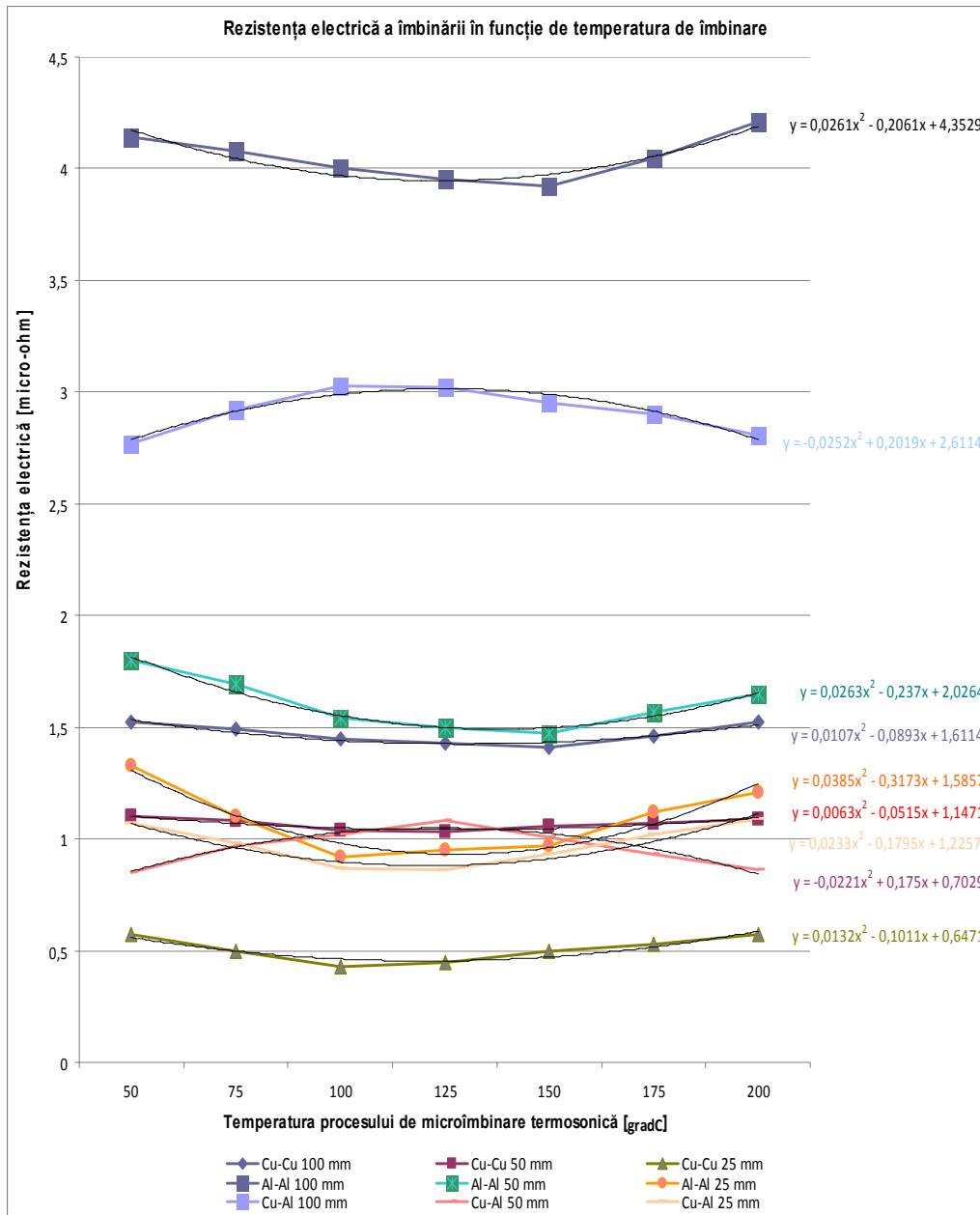


Figura 8.12 Modelele matematice parametrice ale rezistenței electrice pentru diverse temperaturi de preîncălzire (y - Rezistența electrică de contact, x - Temperatura procesului de microîmbinare termosonică)

Prin calculul de regresie statistică, se obțin următoarele ecuații polinomiale de gradul 2:

a. AluminIU-AluminIU, L= 100mm $Re = - 0,0261T^2 - 0,2061T + 4,3529$ (8.1)

b. Cupru-AluminIU, L= 100 mm $Re = - 0,0252T^2 + 0,2019 + 2,6114$ (8.2)

c.	Cupru-Cupru, L= 100 mm	$Re = 0,0107T^2 - 0,0893T + 1,6114$	(8.3)
d.	Aluminiu-Aluminiu, L= 50 mm	$Re = 0,0263T^2 - 0,237T + 2,0264$	(8.4)
e.	Cupru-Aluminiu, L= 50 mm	$Re = 0,0063T^2 - 0,0515T + 1,1471$	(8.5)
f.	Cupru-Cupru, L= 50 mm	$Re = - 0,0221T^2 + 0,175T + 0,7029$	(8.6)
g.	Aluminiu-Aluminiu, L= 25 mm	$Re = 0,0385T^2 - 0,3173T + 1,5857$	(8.7)
h.	Cupru-Aluminiu, L= 25 mm	$Re = 0,0233T^2 - 0,1795T + 1,2257$	(8.8)
i.	Cupru-Cupru, L= 25 mm	$Re = 0,0132T^2 - 0,1011T + 0,6471$	(8.9)

În care Re - rezistența electrică de contact [$m\Omega$] și T -temperatura procesului de microîmbinare termosonică [$^{\circ}C$]. Trasarea acestor diagrame conduce la următoarele concluzii:

- Valorile maxime ale rezistențelor electrice de contact pentru oricare dintre materialele de bază nu depășesc $4,5 \mu\Omega$
- Pentru microîmbinări similare rezistența electrică de contact a îmbinărilor este mai mică decât $2 \mu\Omega$. Valori mai mari decât $2 \mu\Omega$, se întâlnesc la microîmbinările disimilare.
- Variațiile rezistenței electrice cu temperatura de preîncalzire sunt polinomiale de gradul II, parabola având deschidere mare datorită coeficientului apropiat de zero al gradului al doilea
- Considerând variația polinomială de ordinul al II-lea se observă că în cazul îmbinărilor similare (Cu-Cu, Al-Al), parabola are un minim, coeficientul gradului al-II-lea fiind pozitiv. Diferit se întâlnește în cazul îmbinărilor disimilare, unde parabola are un maxim, coeficientul gradului al-II-lea fiind negativ.
- Coeficientul gradului I este la rândul lui maxim 0,3, ceea ce face ca variația să aibă loc într-un interval foarte redus (curba orizontală)

8.2 Cercetarea comparativă a proceselor de microîmbinare cu ultrasunete și microîmbinare termosonică aplicată în cazul îmbinării fir-folie (substrat)

Microîmbinarea conductorilor cu diametre de ordinul zecilor și sutelor de micrometri pe substraturi având grosimi similare sunt aplicații relativ des întâlnite în practica producătorilor de circuite electronice. Alegerea unui anumit procedeu de microîmbinare pentru această aplicație presupune cunoașterea detaliată a caracteristicilor tehnice și funcționale ale procedeelor, astfel încât alegerea să fie judicioasă atât din punct de vedere tehnic, cât și din punct de vedere economic.

În prezent, pentru aceste îmbinări sudarea cu ultrasunete este o alegere des întâlnită oferind condiții de derulare și accesibilitate relativ ridicate, chiar dacă nivelul costurilor unui echipament dedicat acestui procedeu este încă ridicat. Problema tehnică introdusă de aplicarea acestui procedeu este legată de eventualul efect al vibrării unui material aflat la temperatura ambiantă. În cazul unui material cu fragilitate înaltă la această temperatură exista pericolul fisurării îmbinării. Acest pericol poate fi evitat dacă se asigură o preîncălzire a materialului în timpul îmbinării, ceea ce conduce la ideea utilizării procedeuului de îmbinare termosonică. Din acest motiv, unul dintre obiectivele cercetării propuse este de a evidenția comparativ avantajele și dezavantajele procedeuului de microîmbinare cu ultrasunete și microîmbinare termosonică.

8.2.1 Microîmbinarea cu Ultrasunete a conductorilor monofilari din cupru, aur și argint pe substrat de cupru

Materialele de baza utilizate la microîmbinarea cu Ultrasunete precum și compozițiile chimice ale materialelor de bază sunt redate în tabelul 8.5

Tabel 8.5 Materiale de bază utilizate la microîmbinarea cu Ultrasunete

Elemente de aliere MB	Cu [%]	P [%]	Au [%]	Si [%]	Ag [%]	Zn [%]
Cupru s=490 μm	97,97	0,03	-	1,99	-	-
Cupru Φ = 470μm,	98,11	-	-	1,89	-	-
Aur Φ = 470 μm,	10	-	75	-	12,5	2,5
Argint Φ =470μm,	7	-	-	-	92,5	0,5

Instalația de îmbinare utilizată este destinată microîmbinărilor cu ultrasunete a materialelor neferoase de tipul: aluminiu, cupru, aur și argint, componente ce se află în structura microdispozitivelor electronice de tip MEMS. O astfel de instalație este dedicată variantei tip pană (aplatisarea firului se realizează sub forma unei pene) a procedurii de îmbinare cu ultrasunete. Echipamentul și sistemul flexibil de microîmbinare cu ultrasunete [59] are o frecvență de 60-70 kHz și este prezentat în imaginea din figura 8.13.

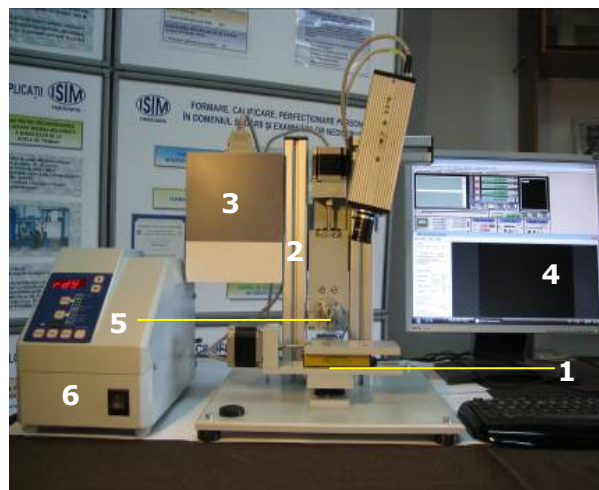


Figura 8.13 Echipament de microîmbinare cu ultrasunete 60-70 kHz, [61]

1- Platforma programabilă cu motoare pas cu pas x,y, 2- Platforma programabilă cu motor pas cu pas z, 3- Sistem de programare cu drivere și software CNC, 4- Sistem de vizualizare CCD cu monitor 19", 5- Ansamblul rezonator ultrasonic 60-70 kHz, 6- Generator ultrasonic

Capul de microîmbinare cu ultrasunete este prezentat în figura 8.14 și are scula activă confecționată din carburi metalice pentru a avea o duritate și o durabilitate ridicată. Suprafața de contact a capului sonotrodei (2) are prelucrate două canale, pe unul dintre acestea introducându-se microfirul ce se dorește a fi îmbinat (materialele uzuale pentru o astfel de aplicație sunt cuprul, argintul sau aurul). Cele două canale au secțiune prismatică; unul dintre canale (5) străbate capul activ, iar celalalt (6) are prevăzută o parte tăietoare transversală(7), așa cum se arată în figură .

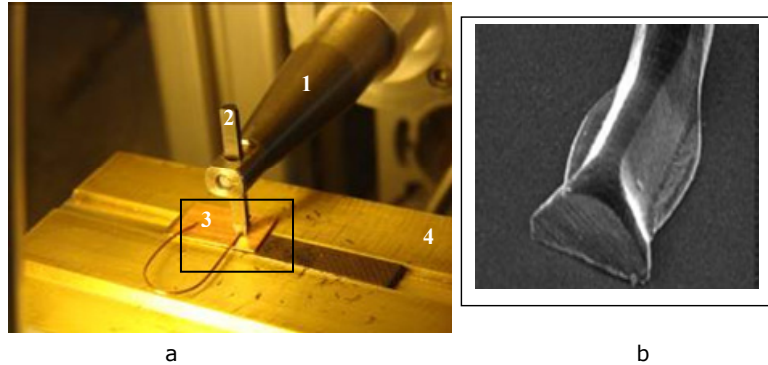


Figura 8.14 (a) Procedul de microîmbinare cu ultrasunete tip „pană” fir din cupru/placa din cupru, 1-sonotrodă, 2- cap activ, 3-componente de îmbinat, 4-nicovală, (b) Forma firului dupa imbinare

Așezarea conductorilor monofilari în aceste canale se poate realiza în funcție de tipul contactului electronic dintre firul respectiv și substrat:

- dacă se dorește îmbinarea firului și apoi secționarea lui, firul se va așeza în partea dreaptă a capului activ al sonotrodei acolo unde este cuțitul tăietor pentru secționarea firului.
- dacă se dorește doar îmbinarea firului pe substrat cu continuarea firului în interconexiune, atunci firul va fi așezat în partea stângă a capului activ al sonotrodei ca în figura 8.15

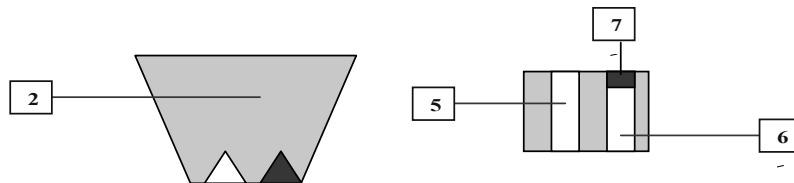


Figura 8.15 Profilul canalelor capului activ sub formă unghiulară: cap activ (2), canal unghiular pentru fir îmbinat neseționat (5), canal unghiular pentru fir îmbinat secționat (6), parte tăietoare (7)

Profilele capetelor de sonotrode au diferite forme: unghiulare sau circulare (rotunde, figura 8.16).

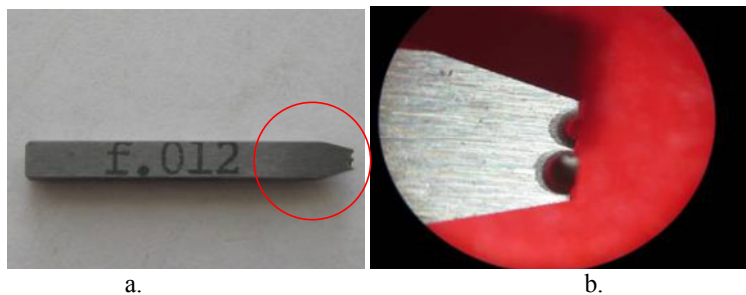
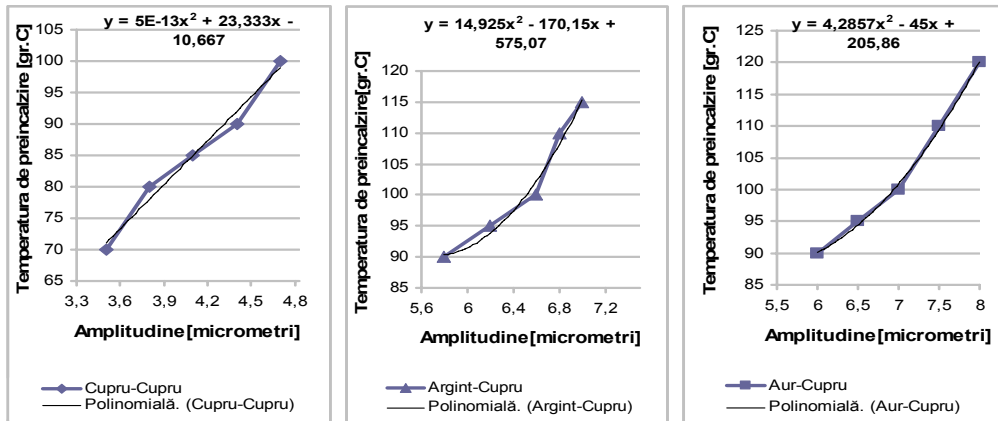


Figura 8.16 Capul activ al unei sonotrode destinat microîmbinării firelor subțiri, Vedere laterala stânga (a), vedere laterală dreapta (b)

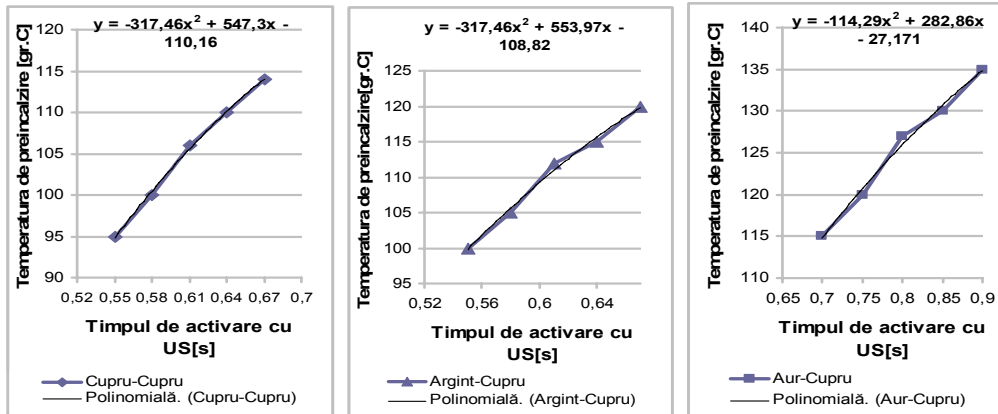
În tabelul 8.6, sunt prezentați parametrii de microîmbinare utilizați

Tabel 8.6 Parametrii de îmbinare cu US a firelor din cupru, argint și aur pe folie de cupru

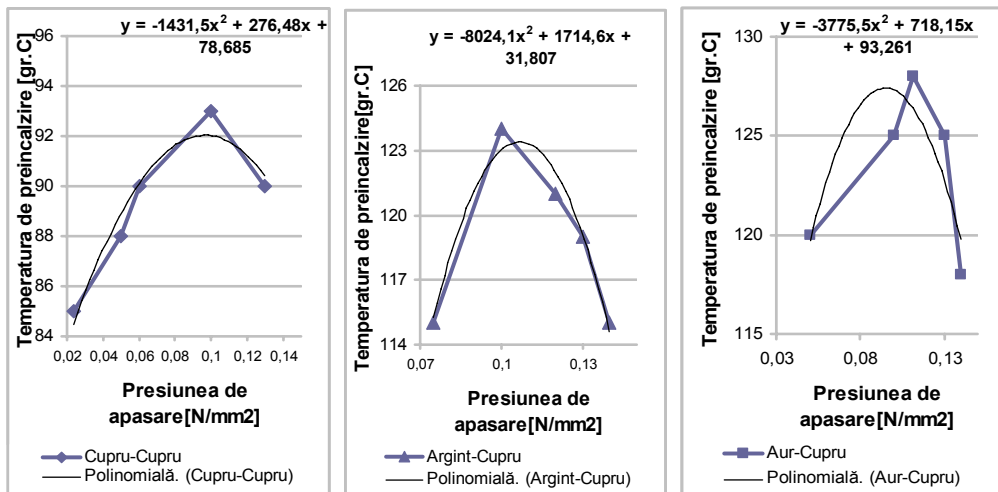
Cuplu materiale de bază	Grosime materiale de bază [μm]		Presiunea [N/mm ²]	Timp activare US[s]	Amplitudine [μm]	Temperatura obținută [°C]
<i>Microîmbinare cu Ultrasunete: Fir Cupru- Folie cupru</i>						
Cu-Cu	500	490	0,05	0,55	3,5	70
Cu-Cu	500	490	0,05	0,55	3,8	80
Cu-Cu	500	490	0,05	0,55	4,1	85
Cu-Cu	500	490	0,05	0,55	4,4	90
Cu-Cu	500	490	0,05	0,55	4,7	100
Cu-Cu	500	490	0,05	0,55	5	95
Cu-Cu	500	490	0,05	0,58	5	100
Cu-Cu	500	490	0,05	0,61	5	106
Cu-Cu	500	490	0,05	0,64	5	110
Cu-Cu	500	490	0,05	0,67	5	114
Cu-Cu	500	490	0,024	0,55	6	85
Cu-Cu	500	490	0,05	0,55	6	88
Cu-Cu	500	490	0,08	0,55	6	90
Cu-Cu	500	490	0,1	0,55	6	93
Cu-Cu	500	490	0,13	0,55	6	95
<i>Microîmbinare cu Ultrasunete: Fir argint- Folie cupru</i>						
Ag-Cu	470	490	0,1	0,90	5,80	90
Ag-Cu	470	490	0,1	0,90	6,20	95
Ag-Cu	470	490	0,1	0,90	6,60	100
Ag-Cu	470	490	0,1	0,90	6,80	110
Ag-Cu	470	490	0,1	0,90	7,0	115
Ag-Cu	470	490	0,1	0,55	8,5	100
Ag-Cu	470	490	0,1	0,58	8,5	105
Ag-Cu	470	490	0,1	0,61	8,5	112
Ag-Cu	470	490	0,1	0,64	8,5	115
Ag-Cu	470	490	0,1	0,67	8,5	120
Ag-Cu	470	490	0,075	0,70	9	115
Ag-Cu	470	490	0,1	0,70	9	124
Ag-Cu	470	490	0,12	0,70	9	121
Ag-Cu	470	490	0,13	0,70	9	119
Ag-Cu	470	490	0,14	0,70	9	115
<i>Microîmbinare cu Ultrasunete: Fir aur- Folie cupru</i>						
Au- Cu	470	490	0,1	0,7	6	90
Au- Cu	470	490	0,1	0,7	6,5	95
Au- Cu	470	490	0,1	0,7	7	100
Au- Cu	470	490	0,1	0,7	7,5	110
Au- Cu	470	490	0,1	0,7	8	120
Au- Cu	470	490	0,1	0,70	8,5	115
Au- Cu	470	490	0,1	0,75	8,5	120
Au- Cu	470	490	0,1	0,80	8,5	127
Au- Cu	470	490	0,1	0,85	8,5	130
Au- Cu	470	490	0,1	0,90	8,5	135
Au- Cu	470	490	0,05	0,80	9	120
Au- Cu	470	490	0,1	0,80	9	125
Au- Cu	470	490	0,112	0,80	9	128
Au- Cu	470	490	0,13	0,80	9	125
Au- Cu	470	490	0,14	0,80	9	118



a. Influența amplitudinii vibrației ultrasonice asupra temperaturii maxime



b. Influența timpului de aplicare a vibrației ultrasonice asupra temperaturii maxime



c. Influența presiunii asupra temperaturii maxime

Figura 8.20 Influențele parametrilor vibrației ultrasonice asupra temperaturii de proces în cazul perechilor de materiale de bază Cu-Cu, Ag-Cu și Au-Cu.

Din grafice rezultă că amplitudinea vibrațiilor cu cât este mai mare cu atât temperatura maximă obținută în timpul microîmbinării este mai mare. Timpul de activare cu ultrasunete cu cât ia valori mai mari, cu atât temperatura maximă obținută se majorează, iar presiunea de apăsare a capului activ pe componente cu cât este mai mare, cu atât temperatura maximă obținută este mai mare. Pe baza datelor experimentale sunt determinate ecuațiile de regresie statistică care determină dependența temperaturii maxime de cei 3 parametri luați în considerare. Aceste ecuații au expresie polinomială de gradul 2:

$$a. \text{ Îmbinare cupru - cupru} \quad T = 5E-13A^2 + 23,333A - 10,667 \quad (8.10)$$

$$T = -317,46t^2 + 547,3t - 110,16 \quad (8.11)$$

$$T = -1431,5p^2 + 276,48p + 78,685 \quad (8.12)$$

$$b. \text{ Îmbinare argint - cupru} \quad T = 14,925A^2 - 170,15A + 575,07 \quad (8.13)$$

$$T = -317,46t^2 + 553,97t - 108,82 \quad (8.14)$$

$$T = -8024,1p^2 + 1714,6p + 31,807 \quad (8.15)$$

$$c. \text{ Îmbinare aur - cupru} \quad T = 4,2857A^2 - 45A + 205,86 \quad (8.16)$$

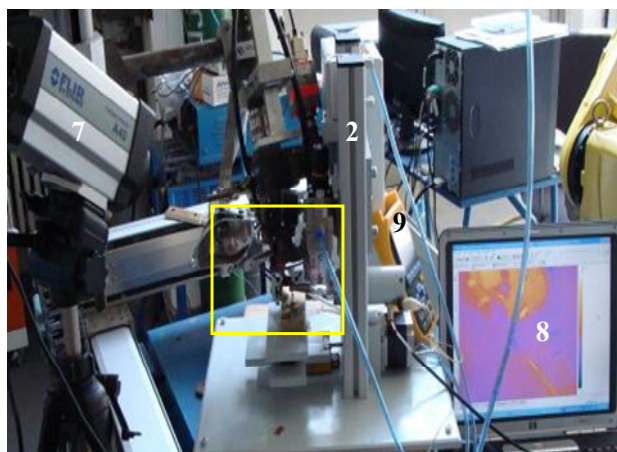
$$T = -114,29t^2 + 282,86t - 27,171 \quad (8.17)$$

$$T = -3775,5p^2 + 718,15p + 93,261 \quad (8.18)$$

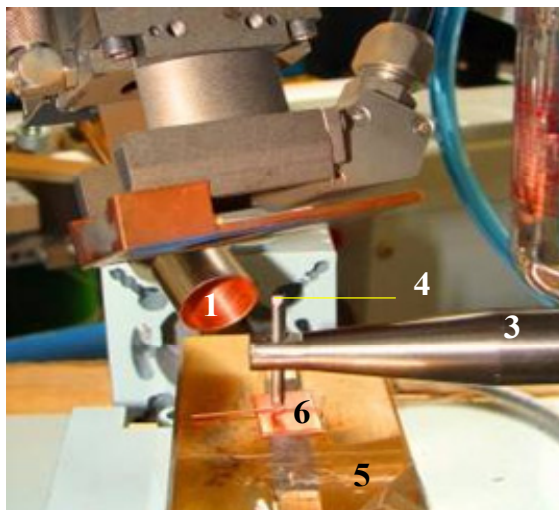
În ecuațiile de mai sus, temperatura maximă T este exprimată în $^{\circ}\text{C}$, amplitudinea vibrațiilor A în $[\mu\text{m}]$, presiunea de apăsare p în $[\text{N}/\text{mm}^2]$ și timpul de activare cu US „ t ” în $[\text{s}]$

8.2.2 Microîmbinarea termosonică a metalelor neferoase utilizând drept sursă termică suplimentară - fasciculul Laser

Pentru îmbinarea termosonică este utilizată ca sursă de energie suplimentară o sursă Laser, combinația Ultrasunete-Laser nefiind aplicată până în prezent în domeniul MEMS. În cadrul experimentărilor, sursa Laser este utilizată atât pentru o preîncălzire a materialului de bază, cât și pentru realizarea îmbinării termosonice. Sistemul hibrid sonotrodă - Laser utilizat este prezentat în figura 8.21, [39].



a



b

Figura 8.21 Echipament microîmbinare hibridă LASER-ultrasunete U.S (a), detaliu (b)
 1- Capul de prelucrare cu fascicul Laser, 2- Instalație cu ultrasunete tip „wedge bonding”, 3- Sonotroda, 4 - Cap activ pentru microîmbinare 5- Nicovală de susținere a componentelor, 6- Piese de îmbinat, 7- Camera termoviziune FLIR SYSTEMS-A 40, 8- Monitor PC pentru înregistrarea imaginilor camerei termoviziune, 9- Termocuplu pentru înregistrarea temperaturii de preîncălzire a componentelor.

Experimentările de microîmbinare termosonică vizează asamblarea de tip conexiune electrică a firelor din cupru, argint și aur pe substraturi de cupru. Sursa termică suplimentară, atât pentru crearea efectului hibrid, cât și pentru preîncălzirea materialelor de bază este un fascicul Laser de la un echipament Laser tip Nd:YAG HL-124P-LCU. Componenta ultrasonică a sistemului hibrid este o instalație pentru sudare cu ultrasunete având o frecvență de 60-70 kHz.

Parametrii regimului de preîncălzire cu fascicul Laser sunt obținuți prin încercări exploratorii, fiind variate succesiv presiunea de apăsare, amplitudinea vibrațiilor și timpul de activare cu ultrasunete, pentru fiecare dintre cuplurile de materiale supuse îmbinării. Materialele de bază cu elementele de aliere supuse procesului de microîmbinare termosonică sunt trecute în tabelul 8.7.

Tabel 8.7 Materiale de bază utilizate la microîmbinarea Laser-Ultrasunete

Elemente de aliere MB	Cu [%]	P [%]	Au [%]	Si [%]	Ag [%]	Zn [%]
Cupru S = 490 μm	97,97	0,03	-	1,99	-	-
Cupru Φ = 470 μm,	98,11	-	-	1,89	-	-
Aur Φ = 470 μm,	10	-	75	-	12,5	2,5
Argint Φ = 470 μm,	7	-	-	-	92,5	0,5

În tabelul 8.8 sunt prezentați parametrii regimului de microîmbinare hibridă Laser – Ultrasunete a firului de cupru, argint și aur-platbandă de cupru

Tabel 8.8 Parametrii microîmbinare hibridă Ultrasunete-Laser Cristal

Nr. Probă	Parametrii regim preîncălzire cu Laser						Parametrii regim U.S.			
	Putere Puls [W]	Durata Puls [ms]	Frecv Puls [Hz]	Energie [jouli]	Putere Medie [W]	Temp prein	Presiune a [N/mm ²]	Amplit	Timp U.S. [s]	Temp. Max.
<i>Parametrii microîmbinare hibridă Ultrasunete-Laser Cristal: fir Cu/placa Cu</i>										
a1	300	0,5	36	0,15	5,4	70	0,05	3,5	0,55	130,5
b1	300	0,5	36	0,15	5,4	70	0,05	3,8	0,55	140
c1	300	0,5	36	0,15	5,4	70	0,05	4,1	0,55	159,8
d1	300	0,5	36	0,15	5,4	70	0,05	4,4	0,55	195
e1	300	0,5	36	0,15	5,4	70	0,05	4,7	0,55	210
a2	300	0,5	36	0,15	5,4	70	0,05	5	0,55	210
b2	300	0,5	36	0,15	5,4	70	0,05	5	0,58	215
c2	300	0,5	36	0,15	5,4	70	0,05	5	0,61	225
d2	300	0,5	36	0,15	5,4	70	0,05	5	0,64	240
e2	300	0,5	36	0,15	5,4	70	0,05	5	0,67	260
a3	300	0,5	36	0,15	5,4	70	0,025	6	0,6	145
b3	300	0,5	36	0,15	5,4	70	0,050	6	0,6	230
c3	300	0,5	36	0,15	5,4	70	0,075	6	0,6	235
d3	300	0,5	36	0,15	5,4	70	0,1	6	0,6	240
e3	300	0,5	36	0,15	5,4	70	0,125	6	0,6	245
<i>Parametrii microîmbinare hibridă Ultrasunete-Laser Cristal: fir Ag/placa Cu</i>										
a4	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	5,8	0,9	170
b4	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	6,2	0,9	270
c4	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	6,6	0,9	300
d4	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	6,8	0,9	330
e4	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	7,0	0,9	335
a5	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	8,5	0,55	260
b5	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	8,5	0,58	270
c5	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	8,5	0,61	290
d5	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	8,5	0,64	320
e5	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	8,5	0,67	360
a6	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,075	9	0,7	155
b6	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	9	0,7	300
c6	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,12	9	0,7	340
d6	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,13	9	0,7	370
e6	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,14	9	0,7	380
<i>Parametrii microîmbinare hibridă Ultrasunete-Laser Cristal: fir Au/placă Cu</i>										
a7	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	6,0	0,7	240
b7	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	6,5	0,7	250
c7	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	7,0	0,7	280
d7	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	7,5	0,7	320
e7	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	8,0	0,7	340
a8	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	8,5	0,7	450
b8	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	8,5	0,75	453
c8	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	8,5	0,80	458
d8	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	8,5	0,85	465
e8	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	8,5	0,90	472
a9	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,05	9	0,8	375
b9	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,1	9	0,8	400
c9	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,11	9	0,8	420
d9	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,12	9	0,8	440
e9	650	0,5	36	3,25	11,7	80	0,13	9	0,8	420

În figura 8.22 sunt redată capturi ale imaginilor termice ale zonei preîncălzite cu fasciculul Laser (a, c, e) și ale zonei încălzite (b, d, f), în timpul procesului de îmbinare cu ultrasunete a componentelor.

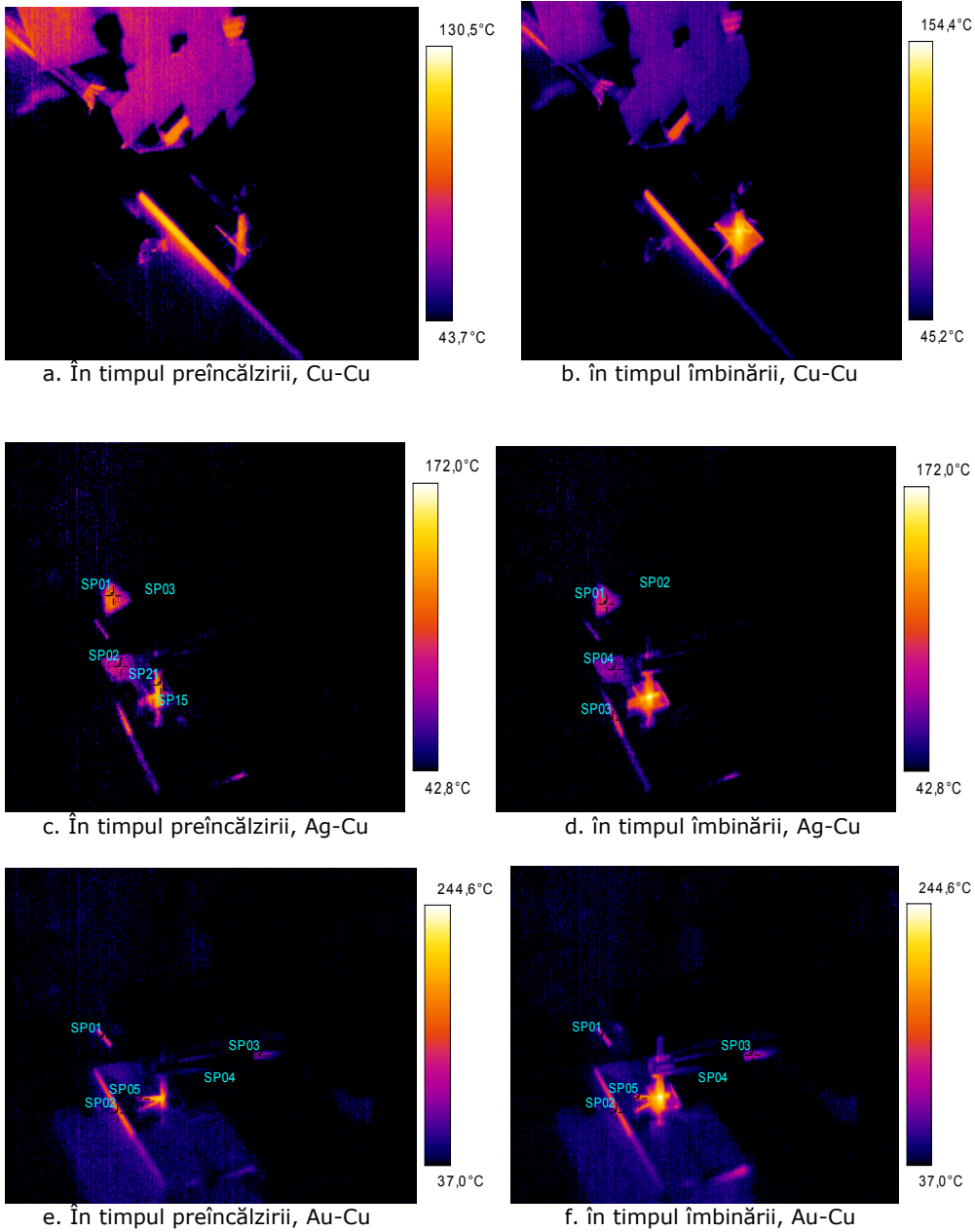
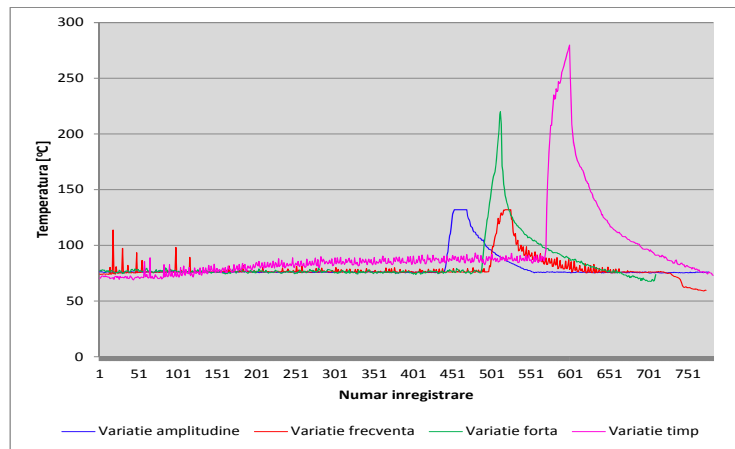
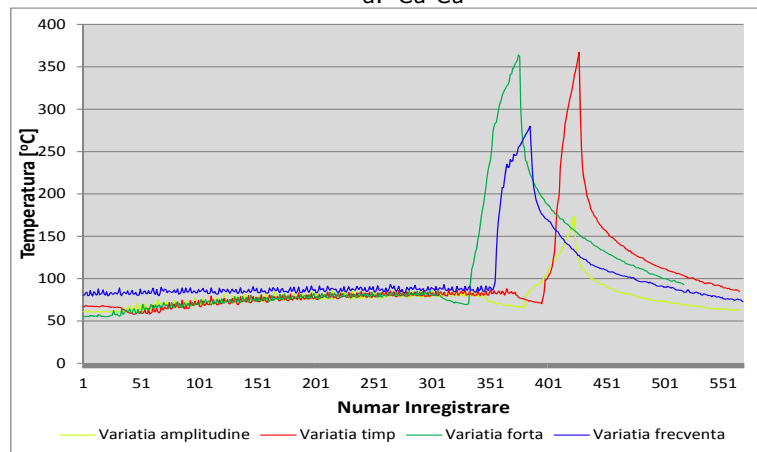


Figura 8.22 Aspecte ale distribuției termice la nivelul materialului de bază

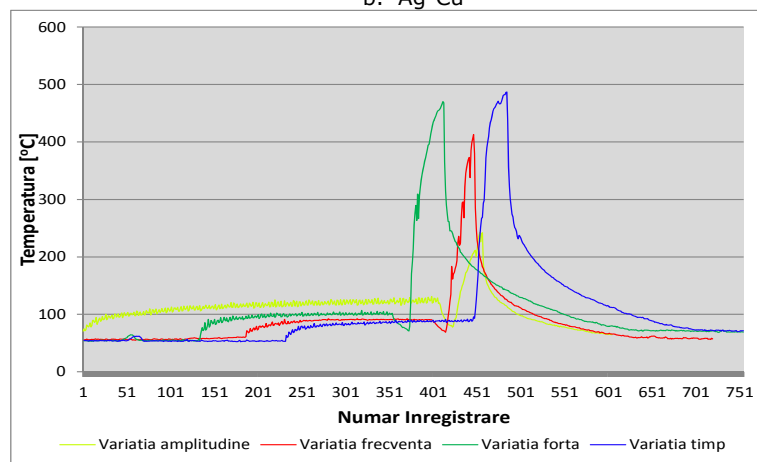
În figura 8.23 a, b și c sunt prezentate ciclogramele termice ale procesului hibrid preîncălzire-îmbinare pentru cuplurile Cu-Cu (a.), Ag-Cu (b.) și Au-Cu (c.).



a. Cu-Cu



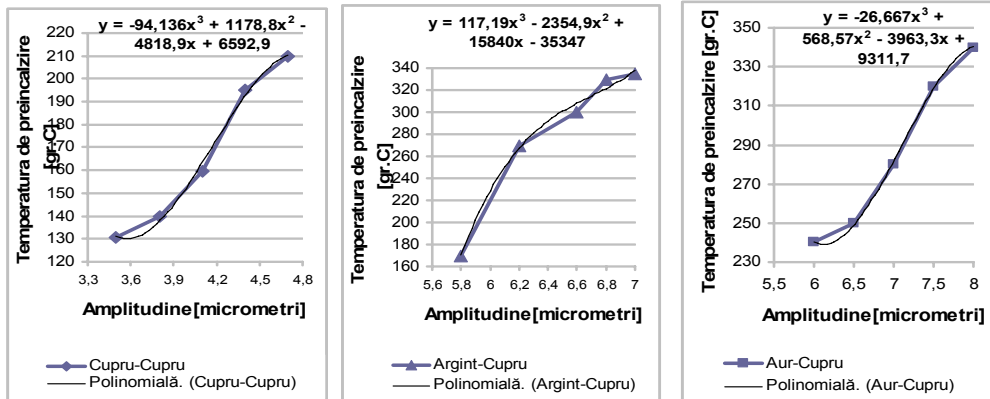
b. Ag-Cu



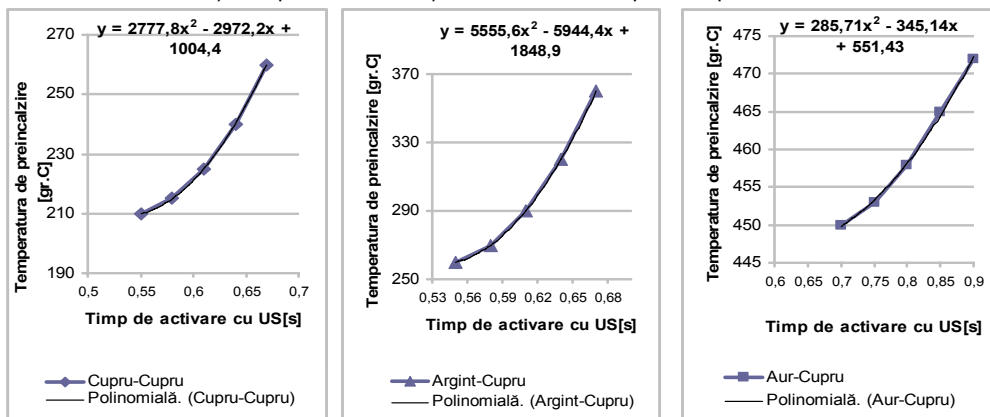
c. Au-Cu

Figura 8.23 Ciclograma termică a procesului hibrid de microîmbinare LASER-Ultrasunete

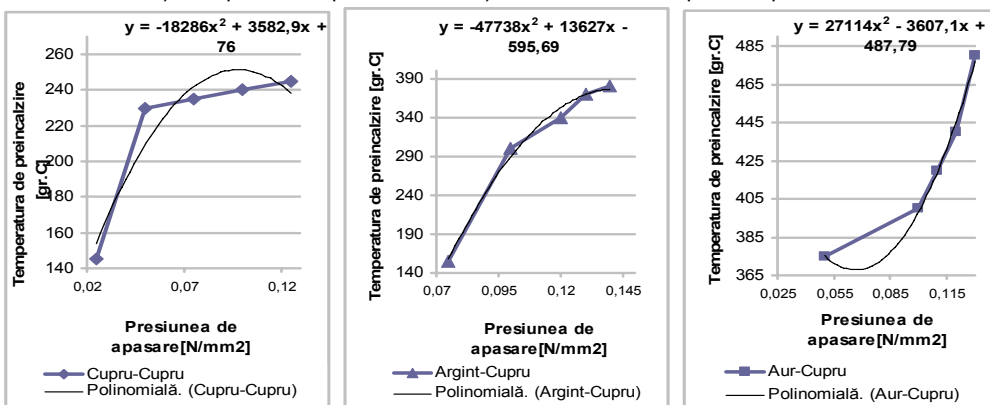
În figura 8.24(a,b,c), sunt prezentate influențele cantitative ale amplitudinii vibrației, timpului de activare US și presiunii utilizate în cadrul procesului asupra temperaturii maxime obținute în urma activării pentru cele 3 perechi de materiale de bază studiate: Cu-Cu, Ag-Cu, Au-Cu.



a. Influența amplitudinii vibrației ultrasonice asupra temperaturii maxime



b. Influența timpului de aplicare a vibrației ultrasonice asupra temperaturii maxime



c. Influența presiunii asupra temperaturii maxime

Figura 8.24 Influențele parametrilor vibrației ultrasonice asupra temperaturii de proces pentru cuplurile Cu-Cu, Ag-Cu, Au-Cu

Ca și în cazul cercetărilor experimentale prin procedeul de microîmbinare cu ultrasunete și în cazul procedeului hibrid Laser-Ultrasunete (termosonic) se observă faptul că parametrii procesului de vibrație ultrasonică, influențează temperatura maximă obținută în zona de îmbinare. Funcțiile statistice ale variației temperaturii maxime exprimate în funcție de amplitudine, timp de activare cu US, respectiv presiunea de apăsare au forme polinomiale:

a. *Microîmbinare Cu-Cu*

$$T = -94,136A^3 + 1178,8A^2 - 4818,9A + 6592,9 \quad (8.19)$$

$$T = 2777,8t^2 - 2972,2t + 1004,4 \quad (8.20)$$

$$T = -18286p^2 + 3582,9p + 76 \quad (8.21)$$

b. *Microîmbinare Ag-Cu*

$$T = 117,19A^3 - 2354,9A^2 + 15840A - 35347 \quad (8.22)$$

$$T = 5555,6t^2 - 5944,4t + 1848,9 \quad (8.23)$$

$$T = -47738p^2 + 13627p - 596,69 \quad (8.24)$$

c. *Microîmbinare Au-Cu*

$$T = -26,667A^3 + 568,57A^2 - 3963,3A + 9311,7 \quad (8.25)$$

$$T = 285,71t^2 - 345,14t + 551,43 \quad (8.26)$$

$$T = 27114p^2 - 3607,1p + 487,79 \quad (8.27)$$

În care T= temperatura maximă obținută[°C], A- amplitudinea vibrațiilor[μm], p- presiunea de apăsare pe componente[N/mm²] și t- timpul de activare cu ultrasunete[s]. Analizând evoluția termică a zonei de îmbinare, se constată o creștere relativ lentă a temperaturii în faza de preîncălzire, creștere care se desfășoară până la temperatura dorită (proces reglabil prin ajustarea puterii fascicului Laser). În figura 8.25 se observă faptul că această creștere, în imaginea prezentată are loc până la o temperatură de aproximativ 80°C, în aproximativ 300 ms.

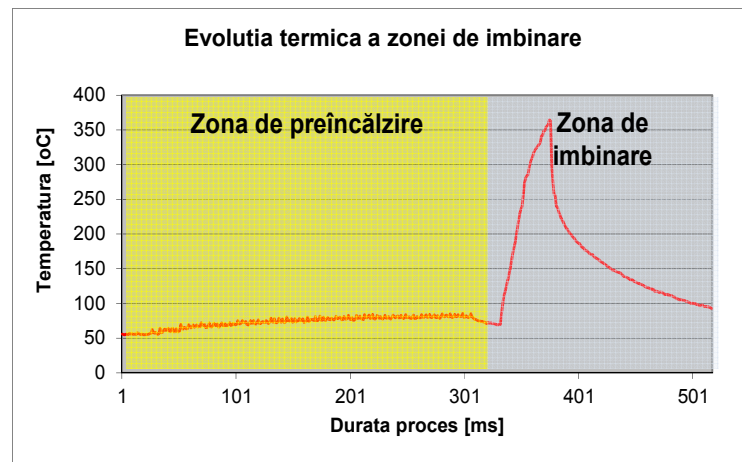
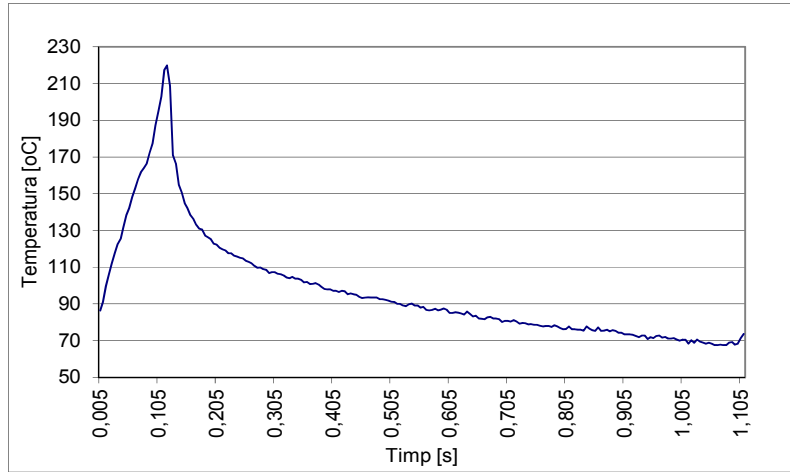
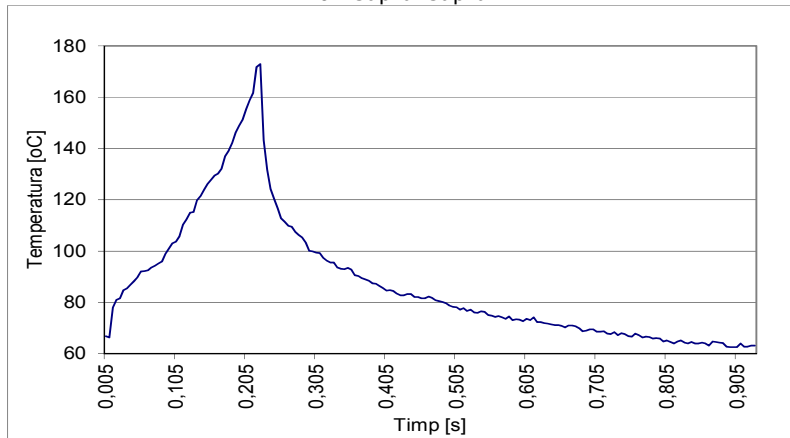


Figura 8.25 Evoluția termică a zonei de îmbinare

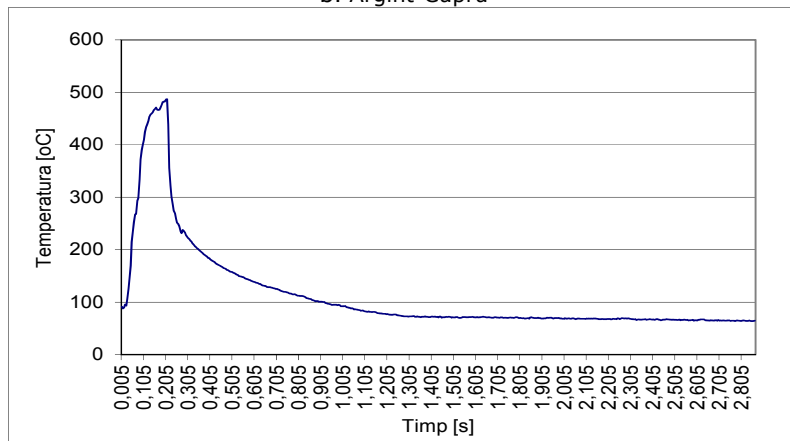
La sfârșitul preîncălzirii urmează procesul de îmbinare propriu-zis, în care intervine sursa cu ultrasunete, formând împreună cu fascicului Laser o sursă hibridă. Această sursă hibridă, produce o creștere rapidă a temperaturii zonei. În figura 8.26 a, b și c sunt prezentate ciclurile termice ale procesului de microîmbinare termosonică a cuplurilor cupru-cupru, argint-cupru și aur-cupru.



a. Cupru-Cupru



b. Argint-Cupru



c. Aur-Cupru

Figura 8.26 Ciclul de creștere-descreștere a temperaturii în timpul microîmbinării (zona de măsurare: punctul de contact dintre sârmă și platbandă)

Modelarea matematică a acestei creșteri evidențiază o variație parabolică, așa cum este prezentat în figura 8.27 „a”. o imagine reprezentând evoluția temperaturii pentru cuplul aur - cupru. Indiferent de parametri tehnologici și de materialul supus microîmbinării, creșterea temperaturii poate fi exprimată matematic printr-o parabolă. Coeficienții acesteia depind însă de factorii amintiți mai sus: parametri tehnologici și natura materialului. În ceea ce privește răcirea, aceasta este la început bruscă, după care tinde să devină asimptotică la axa timpului (figura 8.30 „b”). Durata răcirii este de aproximativ 3 ori mai mică decât cea a încălzirii. Încercările de modelare matematică a procesului de răcire au evidențiat o tendință logaritmică pentru variația temperaturii. La fel ca și la încălzire această tendință se menține independentă, coeficienții expresiei logaritmice depinzând însă atât de parametri tehnologici cât și de natura materialului supus procesului de microîmbinare.

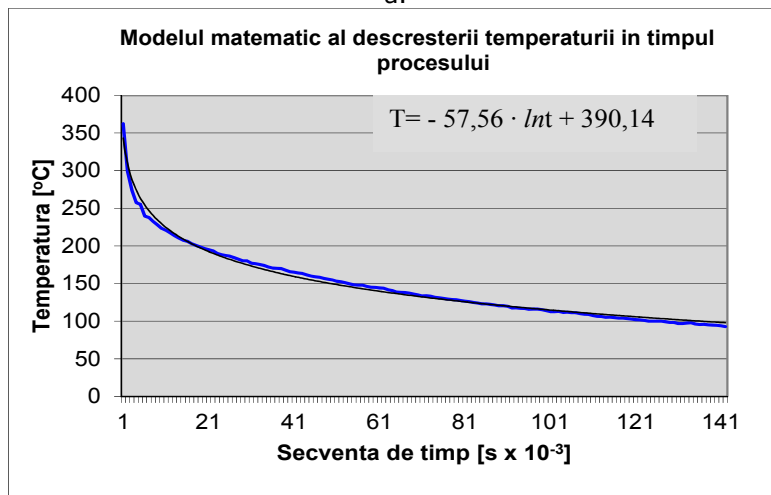
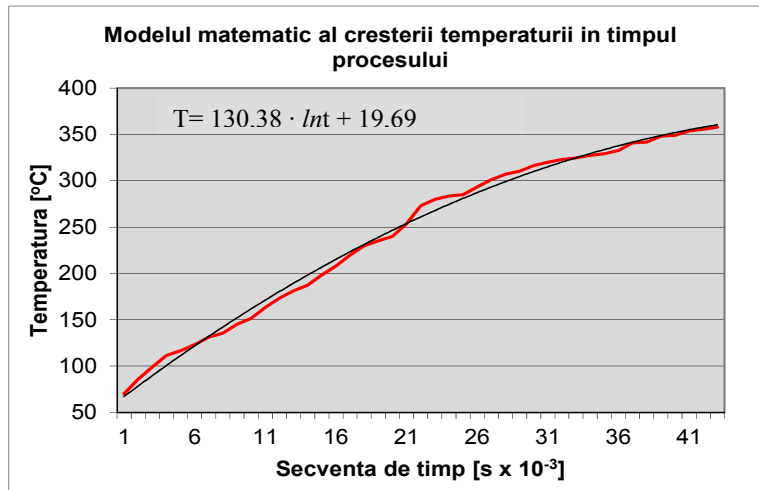


Figura 8.27 Modelarea matematică a creșterii (a.) și descreșterii (b.) temperaturii zonei de îmbinare în timpul procesului

Analizând evoluția termică în momentul aplicării fasciculului de ultrasunete este posibilă construirea de modele matematice parametrice ale variației temperaturii:

a. *Microîmbinare Cupru-Cupru*

$$\text{Creștere temperatura: } T = 70,974 \cdot e^{(0,04 \cdot t)} \quad (8.28)$$

$$\text{Descresștere temperatura: } T = - 24,54 \cdot \ln t + 197,44 \quad (8.29)$$

b. *Microîmbinare Argint-Cupru*

$$\text{Creștere temperatura: } T = 73,87 \cdot e^{(0,0184 \cdot t)} \quad (8.30)$$

$$\text{Descresștere temperatura: } T = - 18,43 \cdot \ln t + 152,86 \quad (8.31)$$

c. *Microîmbinare Aur-Cupru*

$$\text{Creștere temperatura: } T = 130,38 \cdot \ln t + 19,69 \quad (8.32)$$

$$\text{Descresștere temperatura: } T = - 57,56 \cdot \ln t + 390,14 \quad (8.33)$$

Forma exponențială la creștere și logaritmică la descreștere arată faptul că energia este acumulată forțat, într-un timp foarte scurt, de către cele două materiale de bază, transmiterea ei ulterioară prin conducție fiind mai lentă decât acumularea.

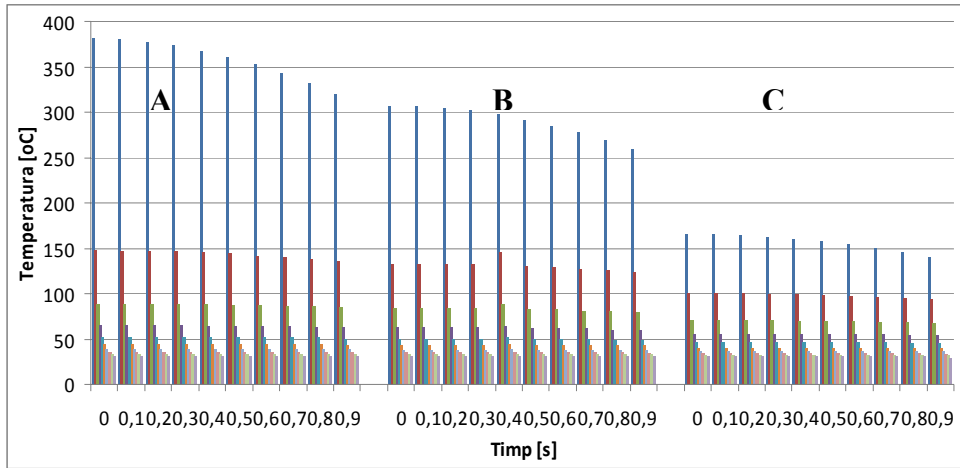
Descresșterea temperaturii la îmbinarea firului din aur cu placa din cupru, datorită faptului că aurul conduce foarte bine căldura (Q), răcirea îmbinării se realizează mai rapid. Răcirea îmbinării se realizează după o curbă logaritmică.

La îmbinările cuplurilor de materiale: cupru/cupru, și argint/cupru coeficienții exponențiale din modelului matematic al variației temperaturii sunt asemănători ca valoare (~ 70-73), iar la îmbinarea cuplului de materiale aur/cupru, coeficienții sunt de două ori mai mari decât coeficienții cuplurilor de materiale cupru/cupru și cupru/argint (~ 130 față de 70-73).

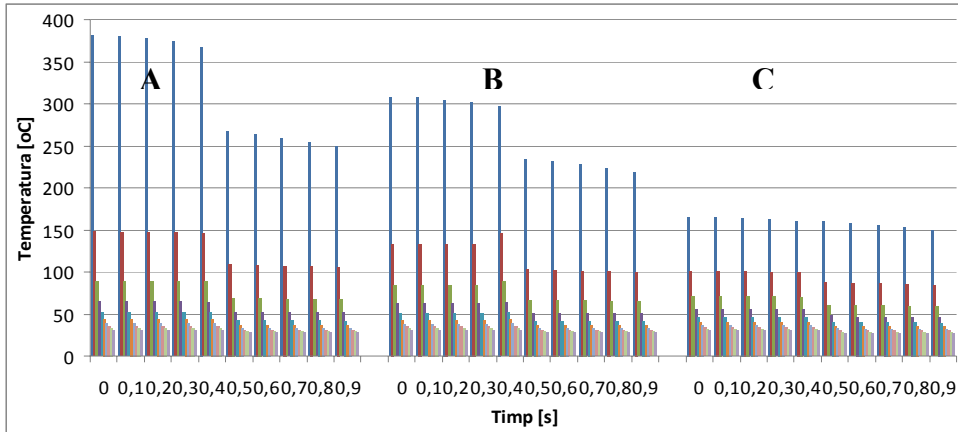
Valorile maxime ale temperaturii la care ajung materialele de bază sunt prezentate în figurile 8.28 a, b și c.

8.2.2.1 Simularea câmpului termic la microîmbinări prin suprapunere a cuplurilor de materiale: cupru-cupru, argint-cupru și aur-cupru.

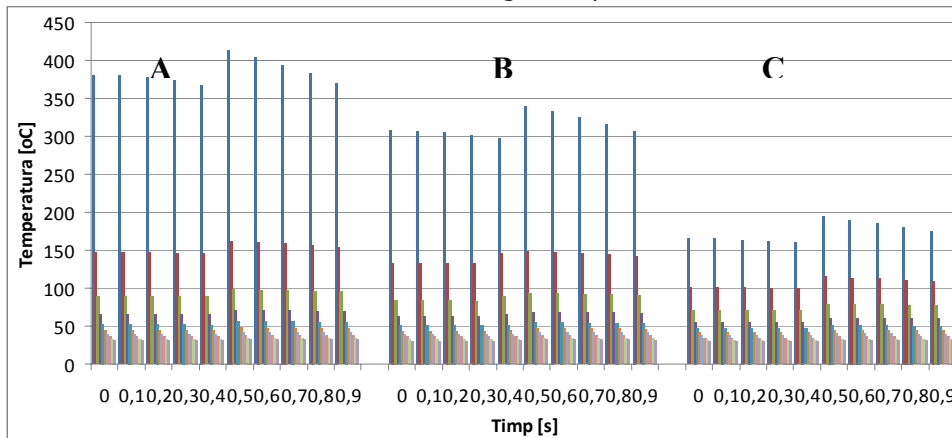
Simularea prezentată în aceste imagini cuprinde încărcarea termică în momentul decuplării surselor termice, analiza fiind făcută în diverse puncte ale zonei de îmbinare, conform figurii 8.29. În figura 8.28 sunt prezentate vârfurile temperaturilor în diverse zone ale microîmbinării în funcție de temperatura de preîncălzire a componentelor.



a. Cupru-Cupru



b. Argint-Cupru



c. Aur-Cupru

Figura. 8.28 Vârfulurile temperaturilor în diverse zone ale microîmbinării

În figura 8.28 (a) în cazul cuplului de materiale cupru-cupru se observă uniformitatea curgerii căldurii în profunzimea materialului de bază și de la un material de bază la celălalt, situație diferită de cazul cuplurilor argint-cupru (figura 8.28 b) și aur-cupru (figura 8.28 c). În cazul cuplului argint-cupru se observă o descreștere accentuată a temperaturii, ceea ce confirmă faptul că argintul a condus căldura mai încet decât cuprul, interfața dintre cele două materiale de bază fiind ușor observabilă în graficul din figura 8.28 b. Diferența dintre temperaturile maxime ale celor două materiale scade cu îmbunătățirea contactului la interfața acestora.

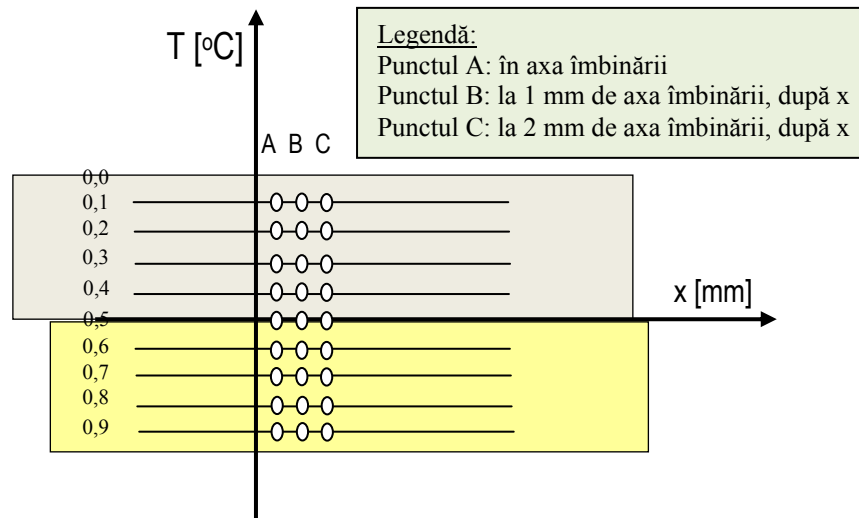


Figura 8.29 Punctele materialelor de bază în care a fost efectuată simularea numerică a încălzirii termice maxime

Reducerea oxizilor și a impurităților de la interfața de contact permite o îmbunătățire a transferului termic de la componenta din argint la cea de cupru, datorită faptului că oxizii prezintă o conductibilitate termică sensibil mai mică decât metalele din care provin.

Contrar acestei stări de fapt, în cazul cuplului aur-cupru se observă faptul că aurul conduce foarte repede căldura către piesa din cupru, răcindu-se componenta din cupru acumulând cea mai mare cantitate de căldură se ajunge astfel la temperaturi superioare celei din aur.

Cuplurile de materiale având conductibilități termice diferite se vor încălzi diferit. Aceasta înseamnă plasticități diferite de la material de bază la material de bază și deci o comportare reologică diferită în timpul presării în vederea îmbinării. Urmărind modul de încălzire a componentelor cuplurilor de materiale de bază există posibilitatea unei optimizări a sistemului de îmbinare, în sensul aplicării presiunii pe materialul care conduce mai repede căldura, astfel încât și componenta inferioară să poată primi o cantitate de căldură suficientă care să o aducă într-o stare înalt plastică.

8.2.2.2 Simularea procesului de microîmbinare termosonică a două folii din cupru îmbinate în puncte prin suprapunere

Cunoscând modul de preîncăzire și temperaturile maxime rezultate în urma

acesteia, precum și condițiile de derulare a procesului de microîmbinare termosonică, se realizează simularea sistemului de microîmbinare (cap activ-componente de bază) pentru a se cunoaște în detaliu modul de tensionare-deformare a componentelor supuse îmbinării, precum și distribuția termică în timpul procesului de îmbinare. Simularea a pornit considerând că inițial componentele de îmbinat au fost preîncălzite și s-a aplicat o sursă termică echivalentă cuplului care asigură încălzirea, Laser-Ultrasunete. Având în vedere complexitatea problematicii abordate microîmbinarea termosonică a materialelor, pentru această etapă s-a realizat parametrizarea elementelor primare necesare modelării. Pentru această aplicație se va folosi programul ANSYS Multiphysics. Datele inițiale luate în calcul privind realizarea procesului de microîmbinare cu ultrasunete fire din cupru pe suport din placă de cupru sunt următoarele:

- Capul activ al sonotrodei este din carbură de wolfram, având striiațiuni specifice de conducere
- Grosimea plăcuțelor substrat este de 250 μm
- Forța de apăsare (rezultată din presiunea de apăsare a capului activ al sonotrodei) este de 0,1daN
- Capul activ al sonotrodei realizează o vibrație ultrasonică cu o amplitudine de 20 μm și cu o frecvență de 70 kHz
- Electrocul inferior sau nicovala se află în poziție fixă, are o suprafață activă de 30x30 mm cu striiațiuni, și preia sarcinile aplicate de către capul activ al sonotrodei
- Durata procesului se divide în patru faze cu cicluri pentru care durata unei perioade este de 0,02 sec:
 - Prima fază este faza forței de apăsare $F_{ap}=0,1 \text{ daN}$, cu timpul de apăsare $t_{ap}= 5 \text{ [s]}$
 - A doua fază, de microîmbinare (de vibrație de 2 perioade cu o amplitudine de 20 μm și cu o frecvență de 70 kHz
 - A treia fază, de menținere sub presiunea forței de apăsare timp de 5 secunde
 - A patra fază, de eliberare a presiunii de apăsare.

Modelarea se va efectua în câmp cuplat electric – termic - structural. Ca tip de element finit se alege pentru materialul tablelor din cupru și pentru materialul electrozilor din carbură de wolfram elementul SOLID 98 care este destinat modelării în câmp cuplat electric – termic - structural. Pentru materialele interfețelor cu o grosime de 50 μm se aleg elementele de contact Targe 170 și Contact 174 care sunt destinate de asemenea modelării în câmp cuplat electric – termic - structural. Pentru discretizarea cu element finit s-a realizat o simulare locală în zona centrală de interes în care se va studia variația temperaturilor, precum și starea de tensiune și deformații. Elementele finite de discretizare: tetraedrice, mai mari către exteriorul zonei de microîmbinare și mai dese și mai mici în zona de îmbinare, rezultând mai multe soluții (mai multe noduri în zona de îmbinare. În figura 8.30 este prezentat un model discretizat, cu $\frac{1}{4}$ din întregul sistem de microîmbinare termosonică.

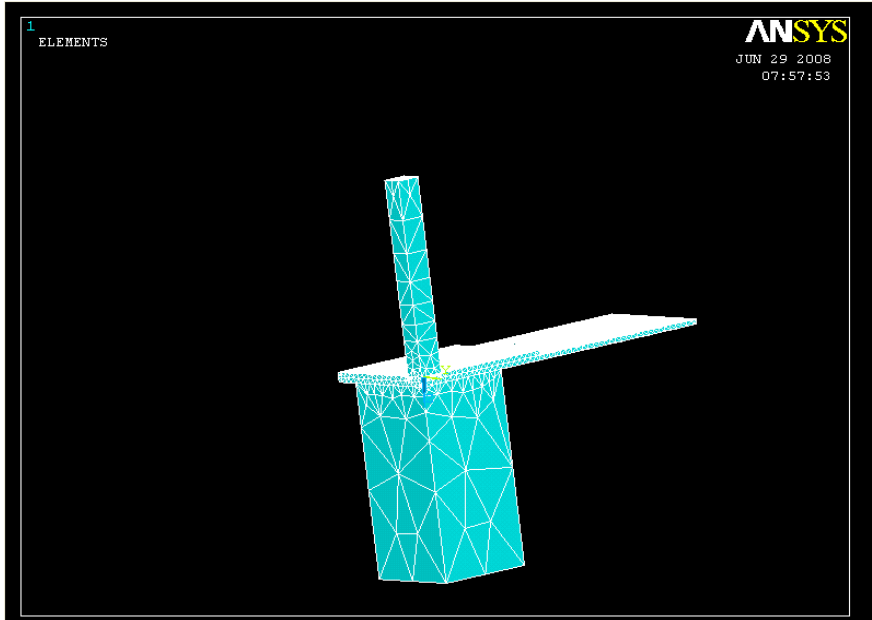


Figura 8.30 Modelul (1/4) discretizat

În figurile 8.31...8.39 se prezintă graficele caracteristicilor mecanice și fizice de variație în funcție de temperatură, captate din programul ANSYS pentru materialul de bază cupru.

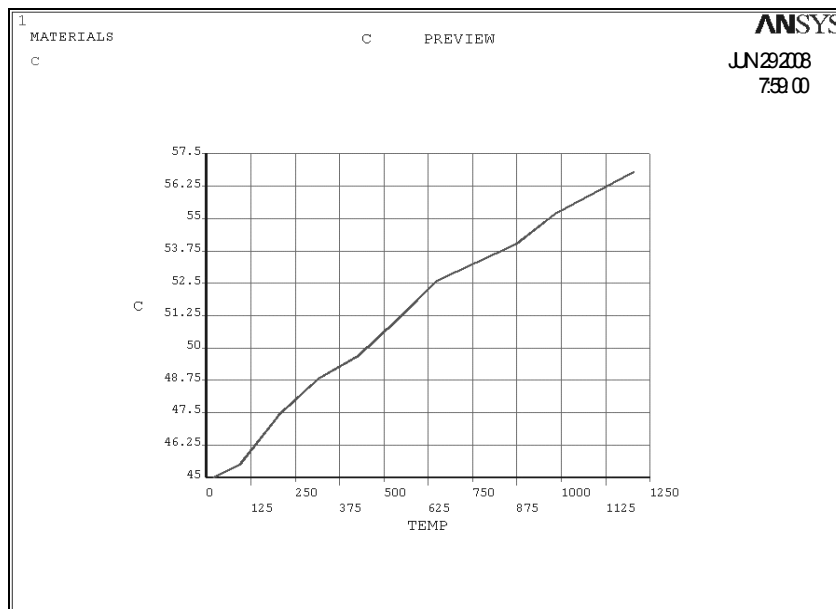


Figura 8.31. Variația căldurii specifice (c) în funcție de temperatură

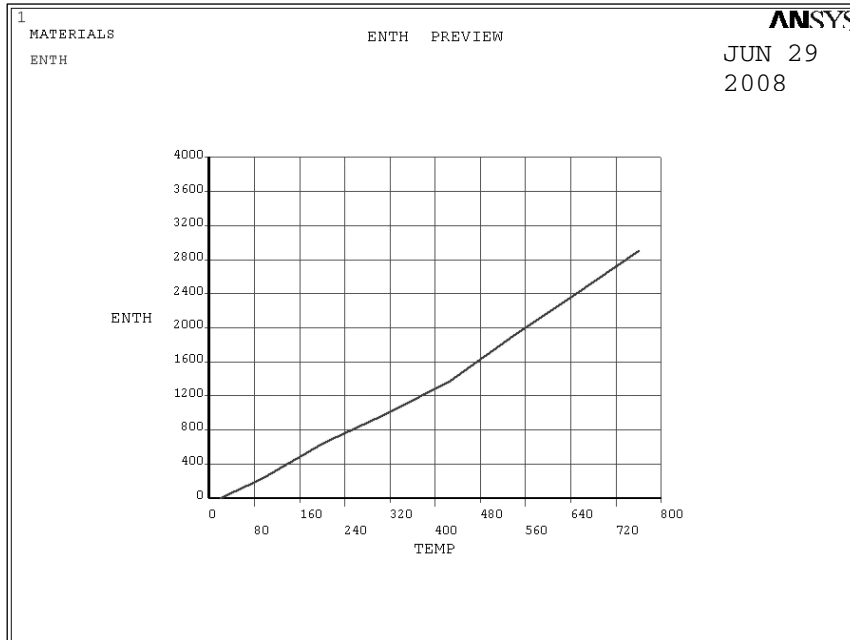


Figura 8.32. Variația entalpiei ($I = ENTH$) în funcție de temperatură

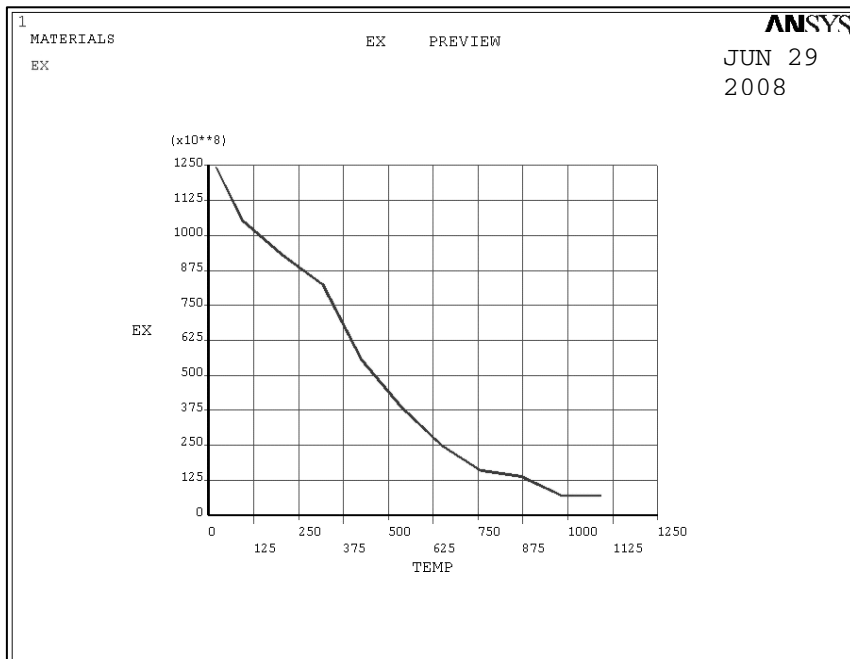


Figura 8.33. Variația modului de elasticitate longitudinal (EX) în funcție de temperatură

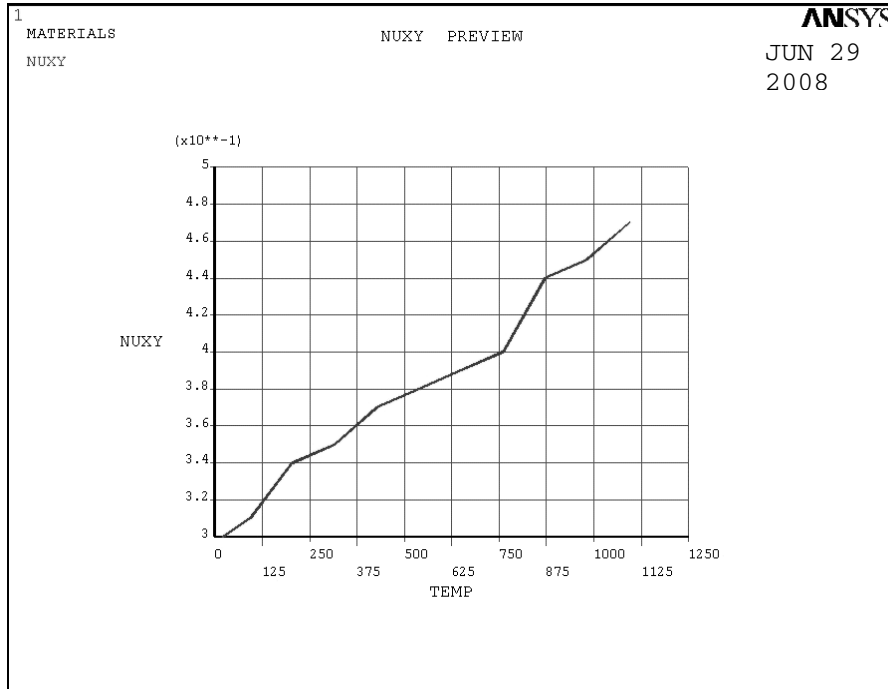


Figura 8.34. Variația coeficientului Poisson ($\nu = \text{NUXY}$) în funcție de temperatură.

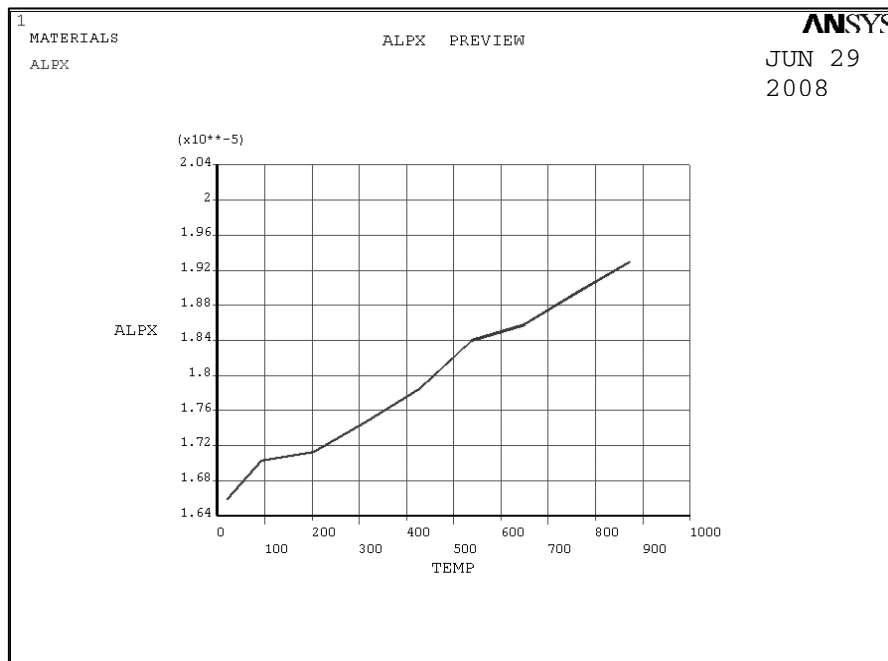


Figura 8.35 Variația coeficientului de dilatare termică liniară ($\alpha = \text{ALPH}$) în funcție de temperatură

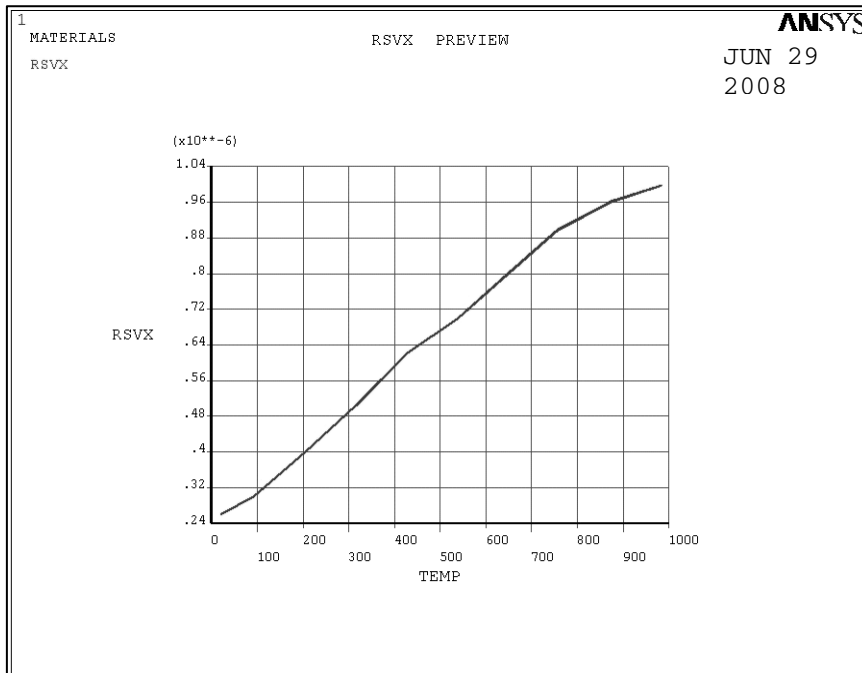


Figura 8.36 Variația conductivității termice (K) în funcție de temperatură.

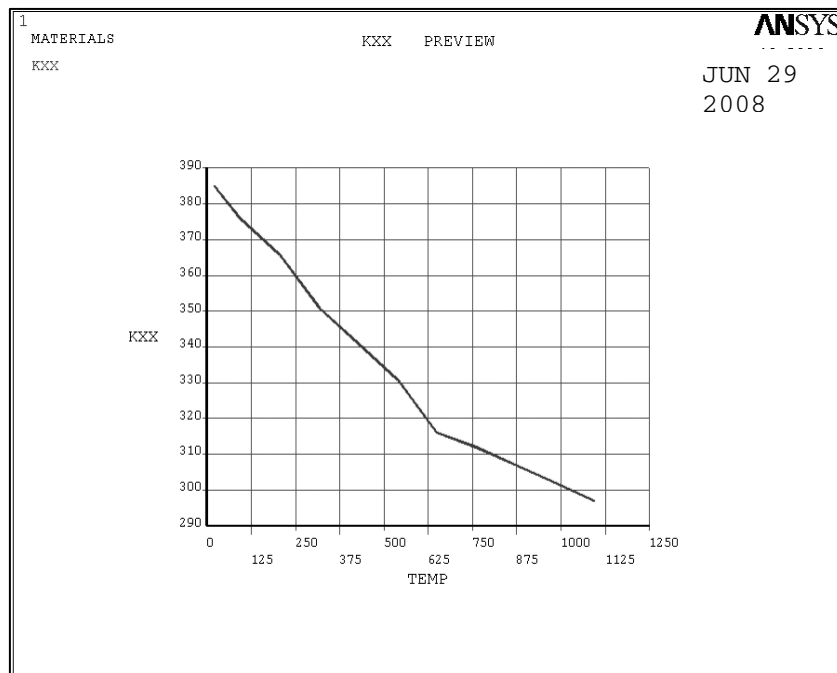


Figura 8.37 Variația rezistivității electrice ($\rho = RSVX$) în funcție de temperatură

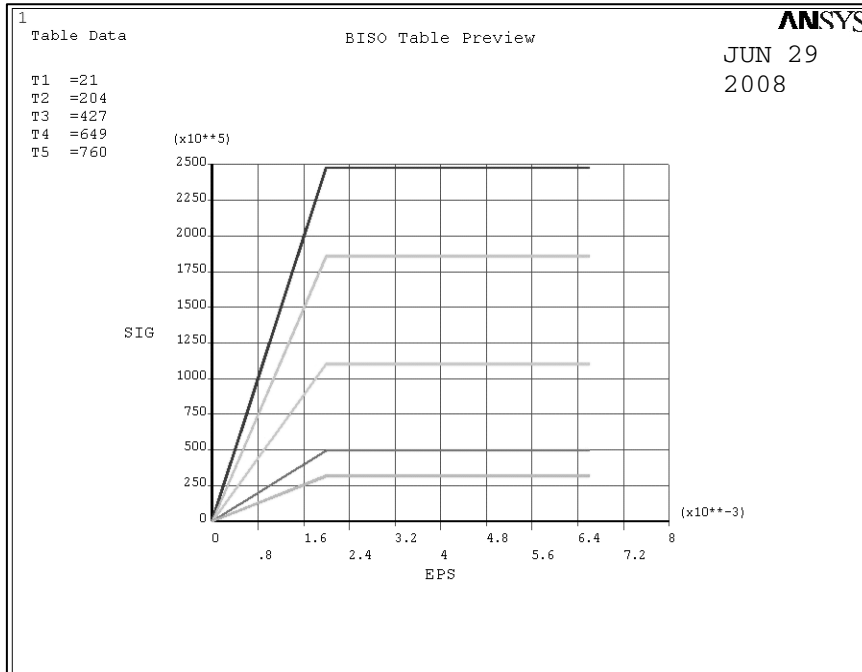


Figura 8.38 Variația limitei de curgere ($R_{p0,2}=SIG$) cu temperatura și cu deformația ($\epsilon=EPS$) pentru cupru.

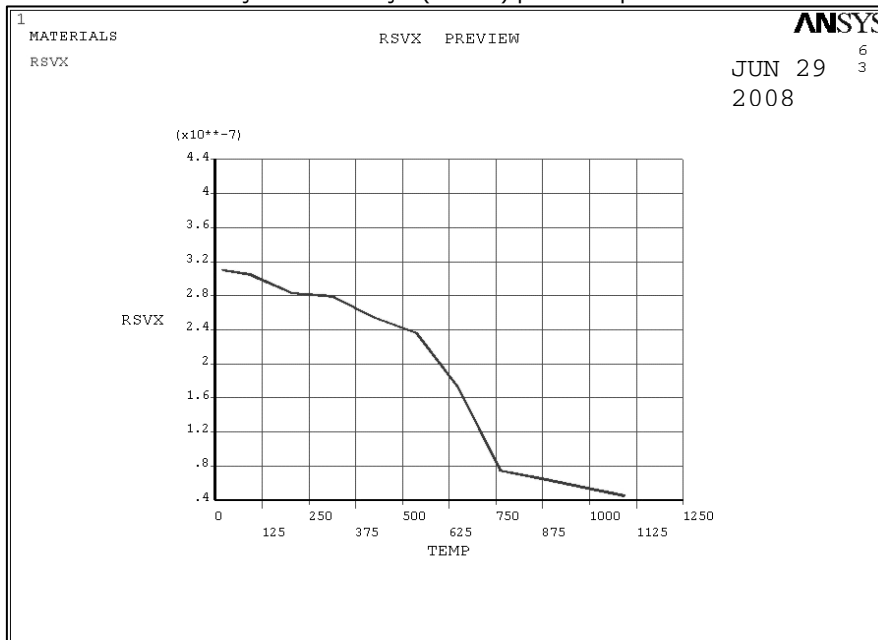


Figura 8.39 Variația rezistivității electrice ($\rho =RSVX$) în funcție de temperatura pentru interfața de cupru.

În figura 8.40 sunt prezentate distribuțiile termice specifice, precum și comportarea mecanică la aplicarea forței de apăsare.

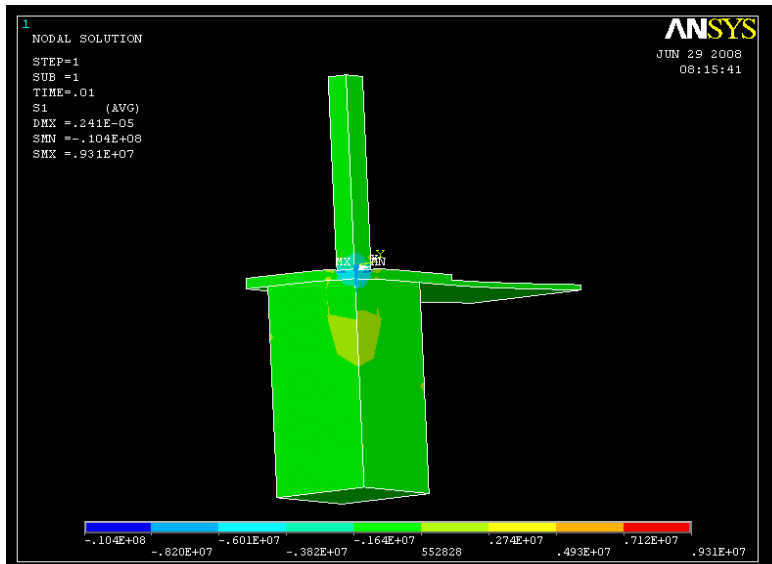


Figura 8.40 Tensiunea principală 1 după faza de acostare

În figura 8.41 sunt prezentate rezultatele calculului de rezistență la forța de apăsare. Se poate observa că în distribuția tensiunilor există întindere în zona nicovalei și compresiune la contactul dintre componente și dintre capul activ al sonotrodei și componente. Valorile tensiunilor sunt negative acolo unde componentele sunt supuse la compresiune, și valorile tensiunilor sunt pozitive acolo unde componentele sunt supuse la întindere.

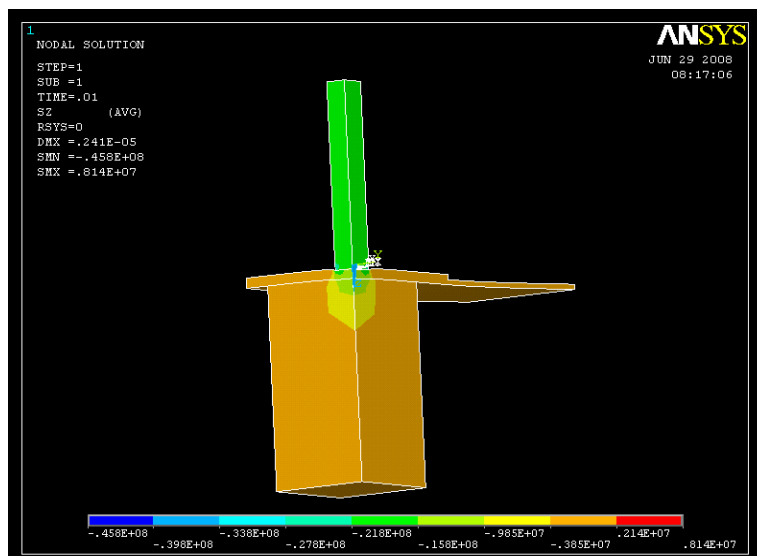


Figura 8.41 Tensiunea pentru axa z după faza de acostare

În figura 8.42 este prezentat începutul fazei de îmbinare a componentelor, de vibrație a capului sonotrodei timp de 2 secunde cu o amplitudine de 20 μm și cu o frecvență de 70 kHz; zona din figura reprezentată cu roșu este zona de preîncălzire a celor două componente

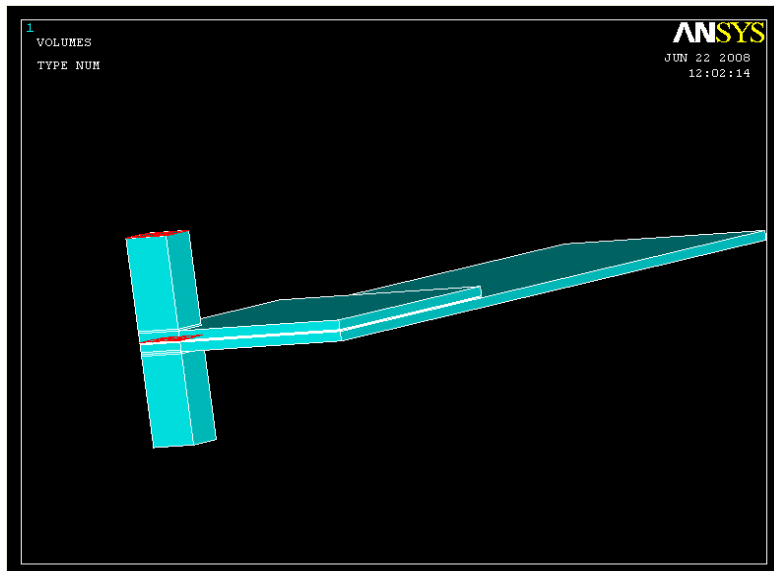


Figura 8.42 Începutul fazei de microîmbinare

În figura 8.43 este prezentat câmpul termic de temperatură, începând cu temperatura mediului ambiant de 19,5°C(zona albastră), iar pe măsură ce se înaintează spre zona de îmbinare, zona de interdifuzie a atomilor celor două componente, temperatura se majorează ajungând până la 465 °C(zona roșie)

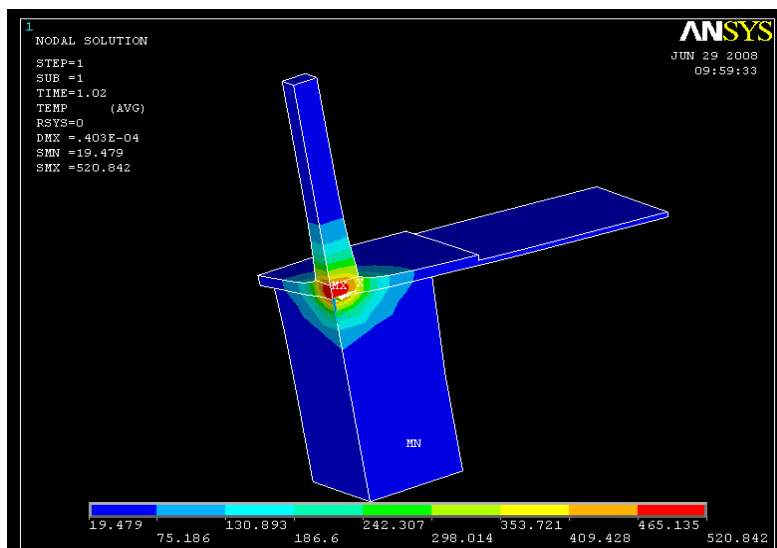


Figura 8.43 Temperatura distribuită în timpul fazei de microîmbinare

În figura 8.44 este prezentat gradientul termic de temperatura după faza de microîmbinare, în care atât materialul nicovalei cât și al capului activ al sonotrodei încep treptat să se răcească zona minimă de temperatură fiind de 13,7°C(albastru), iar zona de difuzie dintre cele două componente din cupru fiind mai încălzită ajungând până la 283 °C(roșu)

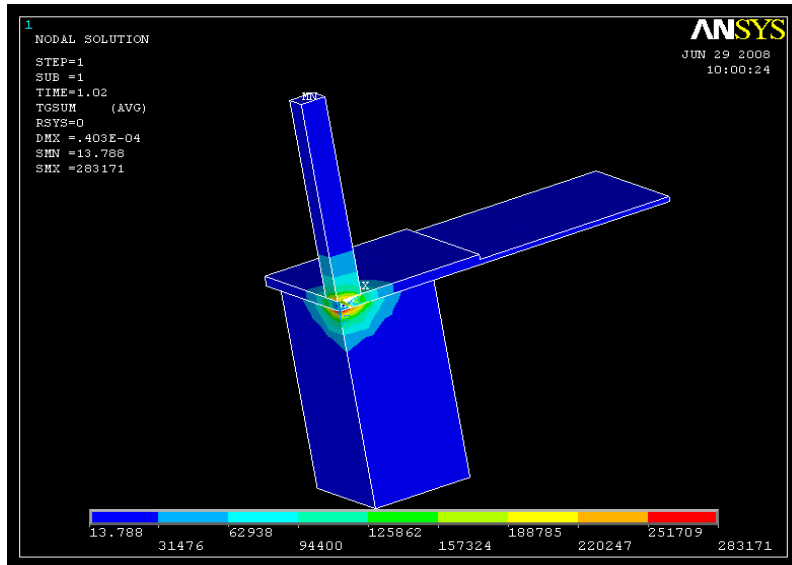


Figura 8.44 Gradientul termic sumă după faza de microîmbinare

În figura 8.45 este prezentată suma fluxului termic după operația de microîmbinare a componentelor

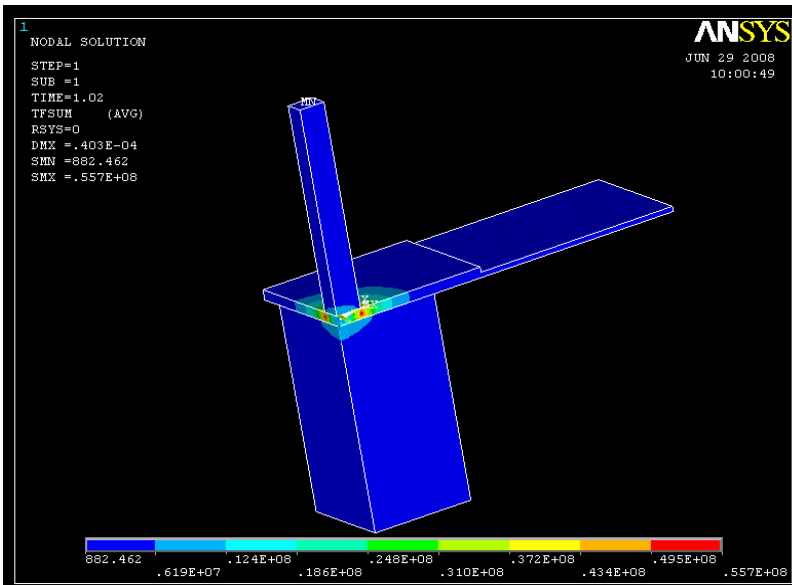


Figura 8.45 Fluxul termic sumă după faza de microîmbinare

În figura 8.46 sunt prezentate valorile temperaturii de trecere de la faza de îmbinare atunci când temperatura are valori ridicate la faza de răcire a componentelor atunci când valorile încep să scadă.

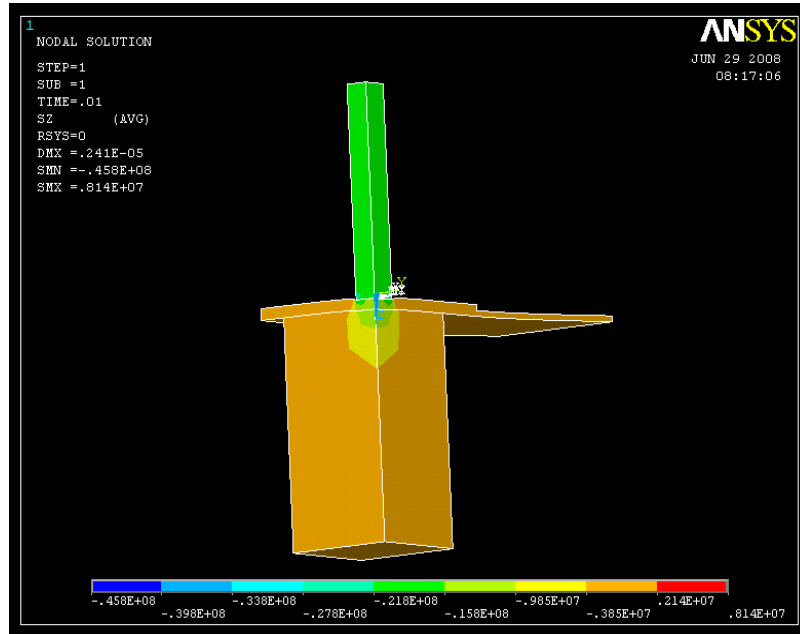


Figura 8.46 Temperatura la faza de răcire

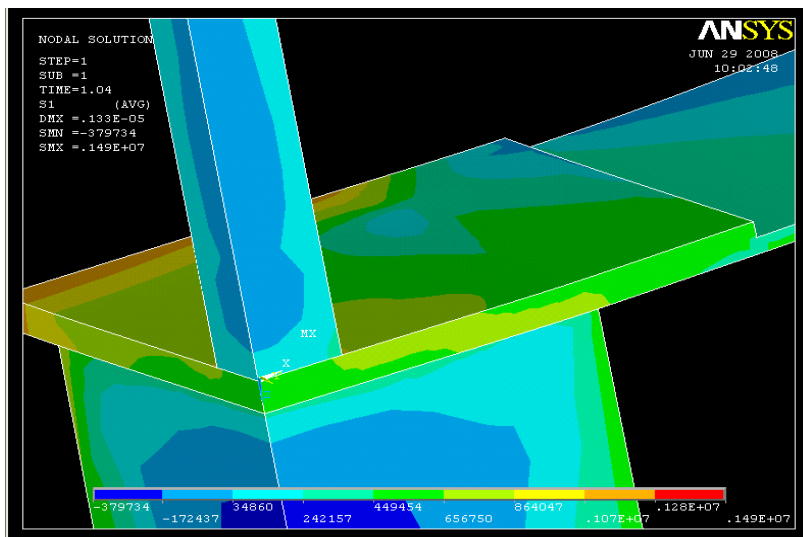


Figura 8.47 Tensiunea principală 1, S1 = 65,7 MPa

În figura 8.48 este prezentat gradientul sumă de temperatură după răcirea componentelor de îmbinat

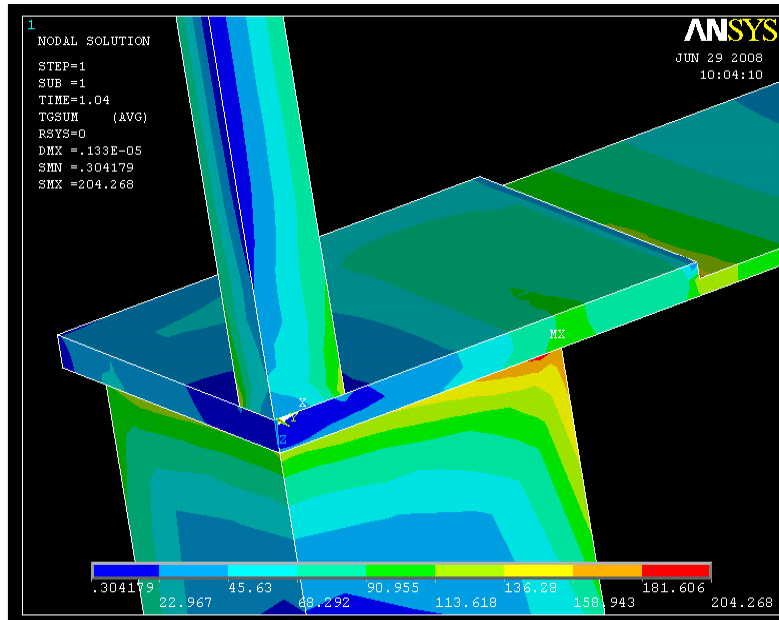


Figura 8.48 Gradientul termic sumă, după răcire

În figura 8.49 este prezentat fluxul termic sumă după răcirea componentelor

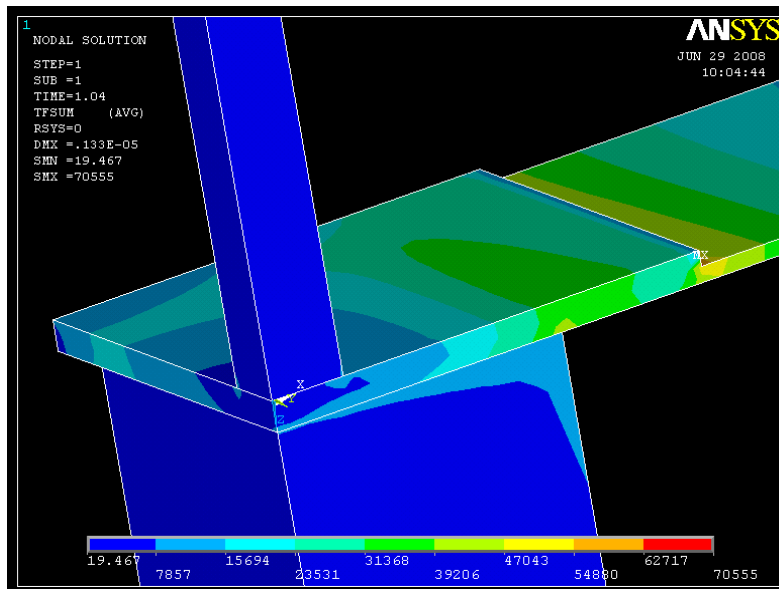


Figura 8.49 Fluxul termic sumă, după răcire

S-au introdus caracteristicile de material, pentru materialele de îmbinare și s-a simulat procesul de microîmbinare. S-au obținut informații utile privind câmpul termic la îmbinare.

Modelarea relevă tensiuni reziduale acceptabile la nivelul microîmbinării sudate, acestea aflându-se sub nivelul limitei de curgere.

8.2.2.3 Caracterizarea morfo-structurală și mecanică a microîmbinărilor

Probele îmbinate sunt caracterizate morfo-structural, rezultatele fiind prezentate în continuare. Rezultatele analizelor metalografice sunt prezentate în tabelele 8.9-8.11, respectiv figurile 8.50-8.52. Pentru examinarea metalografică a aurului se folosește o soluție formată din: 100 ml acid azotic (HNO_3), + 1,4g, clorură de sodiu. Pentru examinarea metalografică a cuprului se folosește clorura cuprică amoniacală, iar pentru examinarea microstructurală a argintului o soluție formată din: 0,75g, Azotat de Argint (AgNO_3) + 100ml apă distilată.[36]

Tabel 8.9 Examinare microscopică, cuplu Cu-Cu

Cuplu	Cupru - Cupru	Ultrasunete [400x]	Laser-Ultrasunete [500x]
MB	Soluție solidă Cu- α_1 , soluție solidă Cu- α_2 , cu incluziuni sferice izolate de Cu_2O		
Difuzie	Formare oxizi de cupru: CuO și Cu_2O		

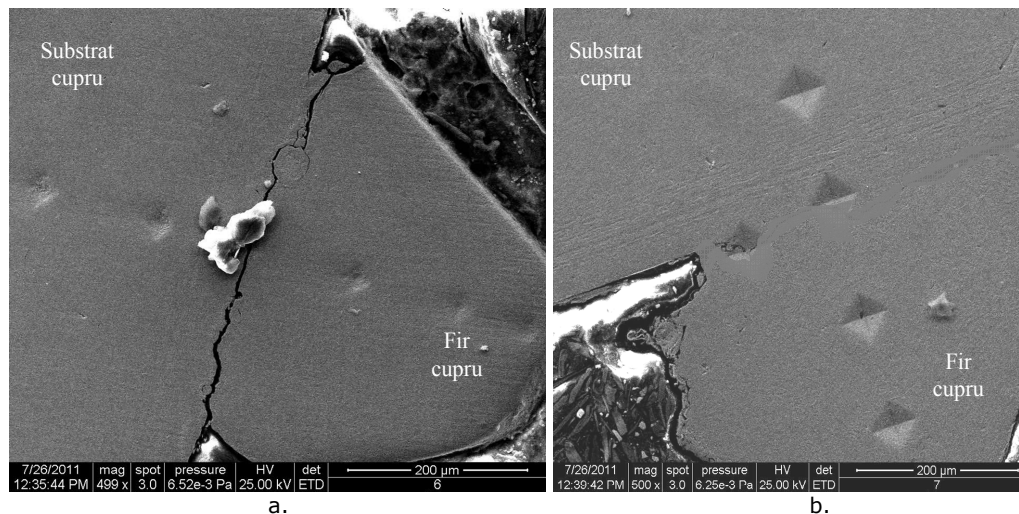


Figura 8.50 Imagini microscopice cu îmbinări termosonice Cu-Cu : microîmbinare cu Ultrasunete (a), microîmbinare Laser-Ultrasunete(b)

Cuprul are o maleabilitate foarte ridicată, de asemenea ductilitatea lui este favorabilă putându-se obține fire foarte subțiri pentru interconexiunile la un dispozitiv MEMS. Cuprul prezintă o rețea cristalină cubică cu fețe centrate. În figura 8.50 sunt prezentate două imagini microscopice, în figura 8.50a - o microîmbinare cu Ultrasunete a componentelor din cupru, iar în figura 8.50b - o microîmbinare hibridă Laser-Ultrasunete. Se poate sesiza din imagini, existența pronunțată a unei fisuri în zona de îmbinare cu ultrasunete, în schimb se poate observa la

microîmbinarea hibridă o interdifuzie compactă o omogenitate a componentelor. Cele două componente din cupru sunt compuse dintr-o fază solidă Cu- α_1 ce cuprinde microparticule de cupru din componenta 2, și o soluție solidă Cu- α_2 cuprinzând microparticule de cupru din componenta 1. La difuzia celor două componente, cuprul oxidează cu aerul atmosferic și formează un strat de cupru oxidant CuO și Cu₂O

Tabel 8.10 Examinare microscopică, cuplu Ag-Cu

Cuplu	Argint-Cupru	Ultrasunete 500x	Laser-Ultrasunete 500x
MB	Soluție solidă Cu- α , cu incluziuni sferice izolate, de Cu ₂ O și soluție solidă Ag- β .		
Difuzie	Formare compuși intermetalici : Cu ₃ Ag, CuAg și Ag ₃ Cu[45]		

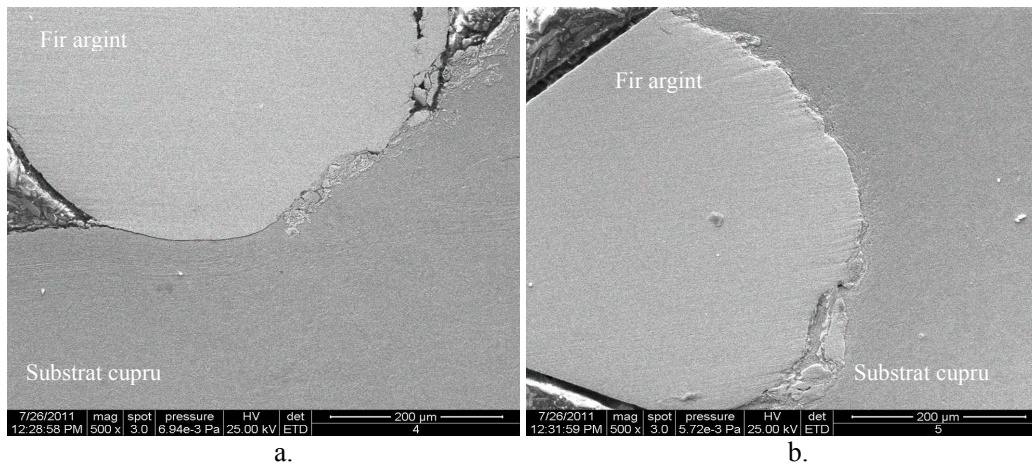


Figura 8.51 Imagini microscopice cu îmbinări fir argint- substrat cupru: microîmbinare cu Ultrasunete (a), microîmbinare Laser-Ultrasunete(b)

În figura 8.51 sunt prezentate două imagini: microîmbinare cu ultrasunete fir argint/substrat din cupru (fig.8.51 a), și o microîmbinare hibridă Laser-Ultrasunete cu aceleași componente (fig.8.51 b). În acest caz, microîmbinarea este alcătuită din două faze solide, prima fază este Cu- α bogată în microparticule de argint, și a doua fază solidă Ag- β în care sunt întrepătrunse microparticule din cupru. Cele două soluții solide, au o structură de rețea cristalină cubică cu fețe centrate. La difuzia celor două componente, și mai ales la microîmbinarea hibridă Laser-Ultrasunete unde intervine preîncălzirea componentelor, se formează compuși intermetalici de forma: Cu₃Ag, CuAg și Ag₃Cu

Tabel 8.11 Examinare microscopică, cuplu Au-Cu

Cuplu	Aur-Cupru	Ultrasunete 500x	Laser-Ultrasunete 500x
MB	Soluție solidă Cu- α , soluție solidă Au- β și incluziuni sferice izolate de Cu ₂ O		
Difuzie	Formare compuși intermetalici AuCu, Cu ₃ Au și Au ₃ Cu [45]		

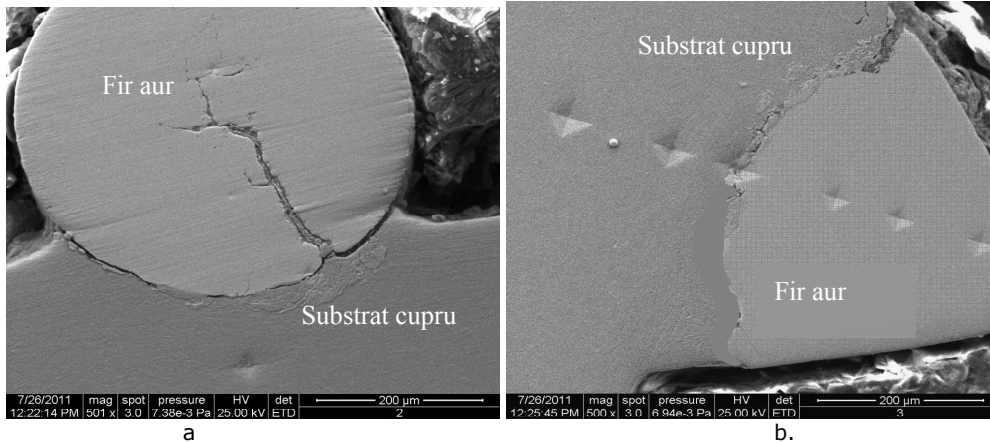


Figura 8.52 Imagini microscopice cu îmbinări fir aur - substrat cupru: microîmbinare cu Ultrasunete (a), microîmbinare Laser-Ultrasunete(b)

În figura 8.52 sunt prezentate două imagini: microîmbinare cu ultrasunete fir aur/substrat din cupru (fig.8.52 a), și o microîmbinare hibridă Laser-Ultrasunete cu aceleași componente (fig.8.52 b). În acest caz microîmbinarea este alcătuită din două faze solide, prima fază este Cu- α bogată în microparticule de aur, și a doua fază solidă Au- β în care sunt întrepătrunse microparticule din cupru. Cele două soluții solide, au o structură de rețea cristalină cubică cu fețe centrate. Se poate observa comportamentul firului de aur la o îmbinare doar cu ultrasunete, prin fisurarea acestuia și o microîmbinare omogenă în imaginea din figura 8.52.b Cunoscut fiind faptul că în timpul încălzirii există posibilitatea formării de compuși intermetalici între elementele care compun cele două aliaje de bază (chiar și în lipsa unei topiri a acestora, dar prin accelerarea procesului de difuzie la temperaturi elevate), se consideră drept potențial risc durificarea locală (în zona de microîmbinare) a materialelor de bază. Această durificare este principala sursă a fenomenului de fragilizare a îmbinării cu risc ridicat de fisurare în timpul exploatării.

Din acest motiv se consideră oportună evaluarea durității imbinărilor. Pentru încercare este utilizat un microdurimetru Vickers (fig.8.53) cu analiza digitală a imaginilor. Forța de apăsare aplicată componentelor este de $F = 200$ gr, iar timpul de menținere la apăsare $t_{ma} = 10$ s.

Se supun la încercarea de microduritate două seturi de probe îmbinate:

- primul set este compus din patru probe de microîmbinare a firelor din aur, argint și cupru pe un substrat din cupru, obținute prin procedeul de microîmbinare cu ultrasunete.
- cel de-al doilea set sunt probe de microîmbinare a firelor din aur, argint și cupru pe un substrat din cupru, obținute prin procedeul hibrid de microîmbinare termosonică, Laser-Ultrasunete



DOMENIU	HV0,01-HV1
SARCINA	10-1000g
REZOLUȚIE	0,03 μm reglabil
INDENTOR	Diamant, Vickers
OBIECTIVE	10X,40X
MICROSCOP	Citire analogica
CONTROL	Automat al forței de încărcare
CONTROL	Video al imaginii

Figura 8.53 Microdurimetru Vickers

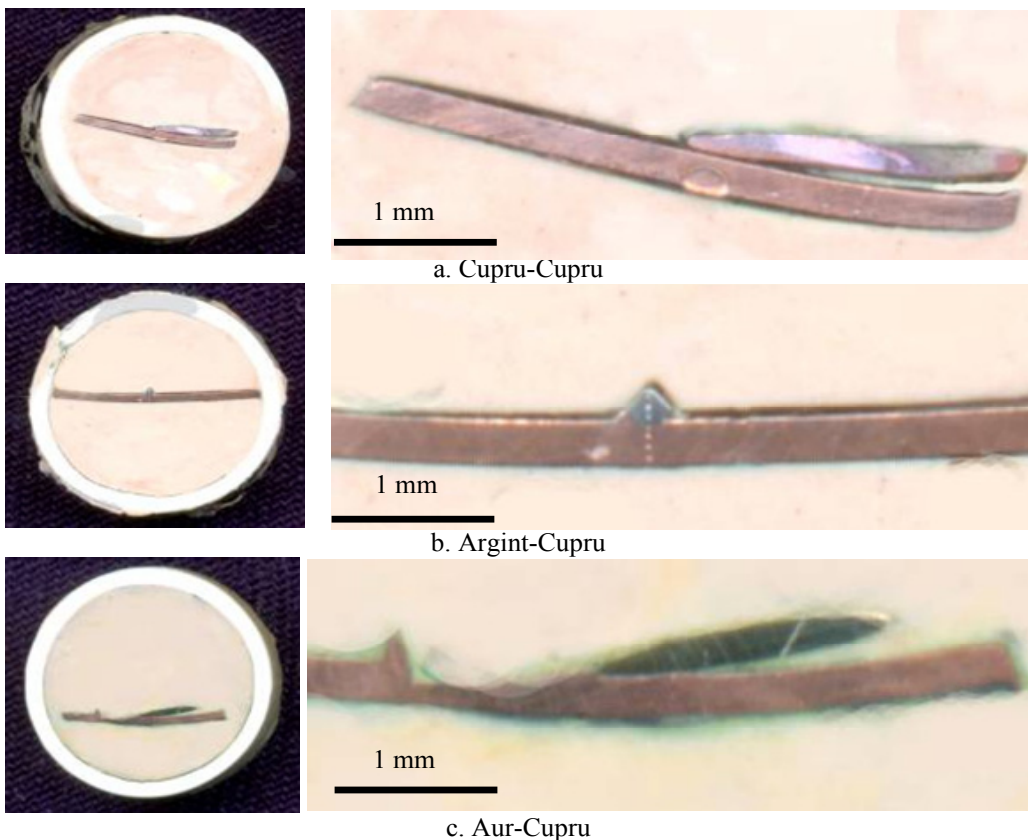


Figura 8.54 Probe realizate prin procedeul termosonic supuse încercării de duritate

În figura 8.55 (a,b) sunt prezentate imagini ale unor microîmbinări amprentate în vederea determinării microdurităților la cuplul de materiale Cu/Cu

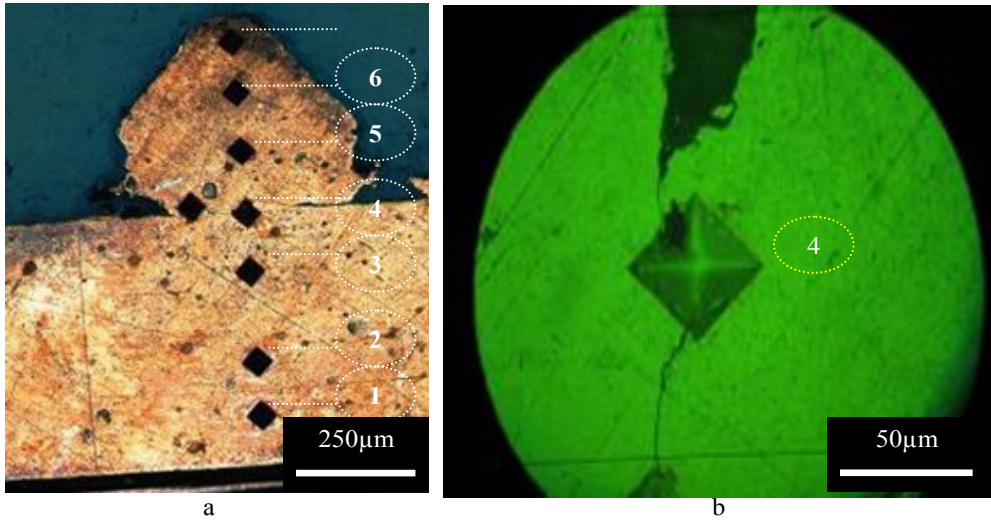


Figura 8.55 Determinări microduritate Cupru/Cupru. (a) Numărul de amprentări,(b) detaliu amprenta nr.4

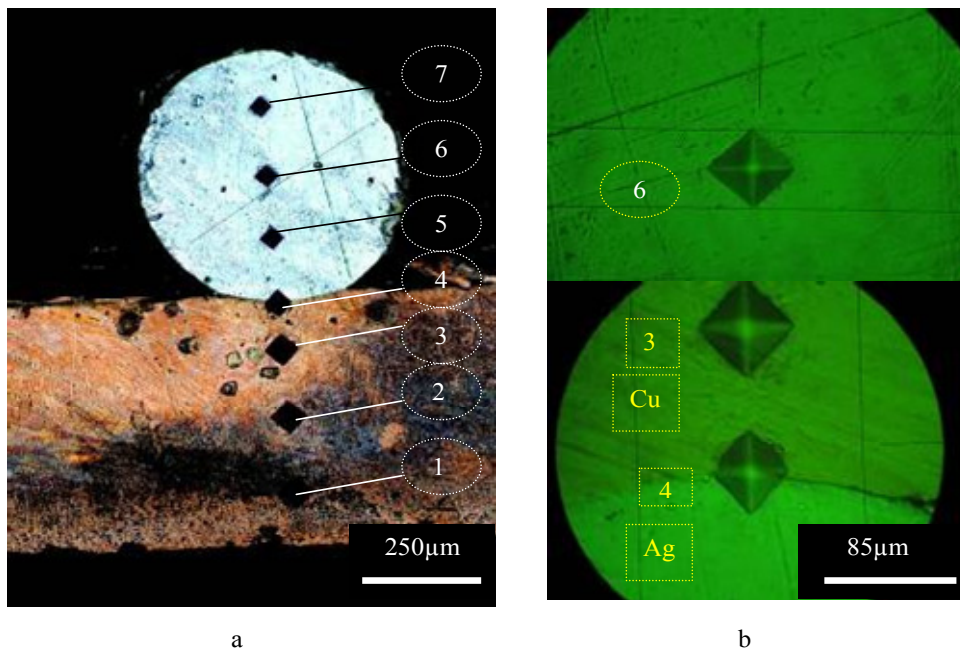


Figura 8.56 Determinări microduritate Argint/Cupru. (a) Numărul de amprentări,(b) detaliu amprente nr.3,4 și 6

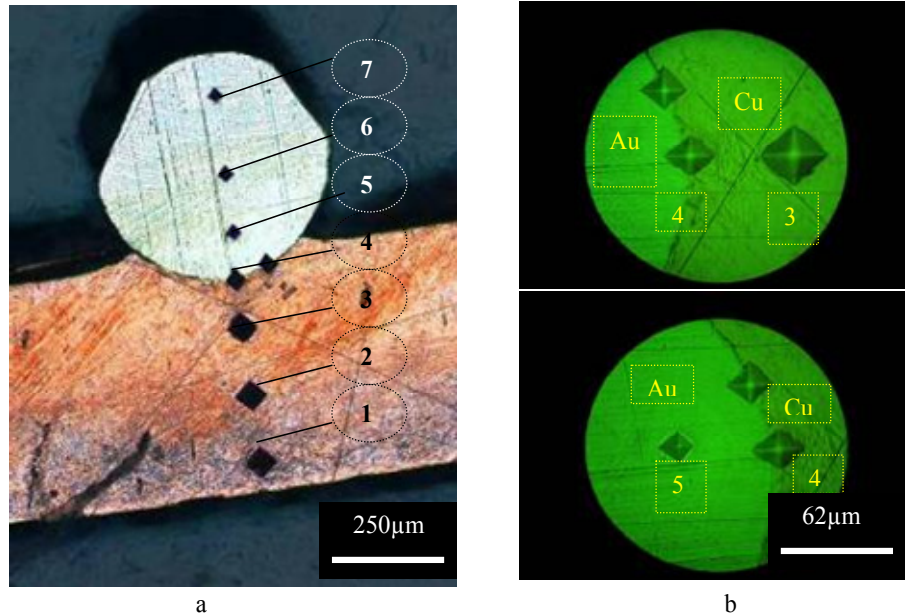
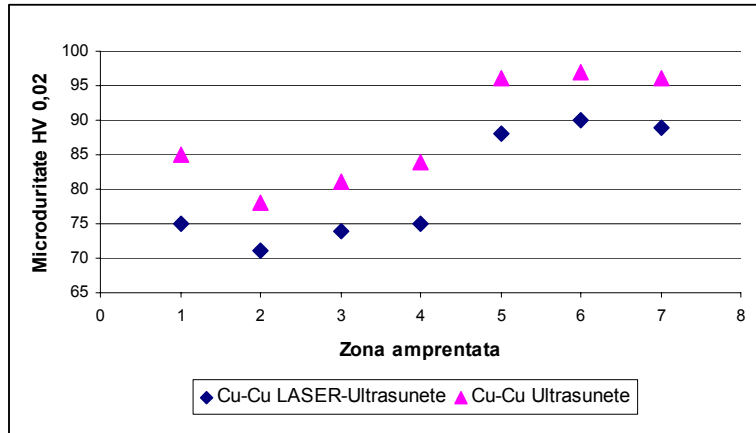


Figura 8.57 Determinări microduritate Aur/Cupru. (a) Numărul de amprentări, (b) detaliu amprente 3,4 și 5

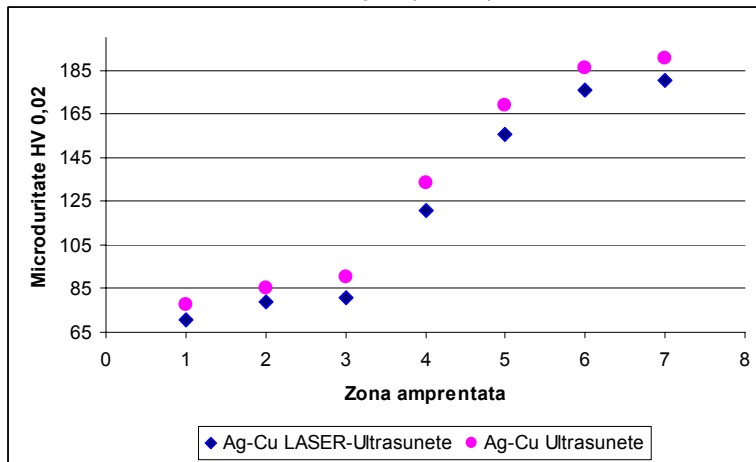
Încercarea de microduritate a evidențiat valori relativ asemănătoare între îmbinările realizate prin procedeul cu ultrasunete clasic și prin procedeul hibrid Laser-Ultrasunete, acestea fiind prezentate în tabelul 8.12 și figura 8.58.

Tabel 8.12 Valorile microdurităților efectuate în zona de microîmbinare, US și US-Laser

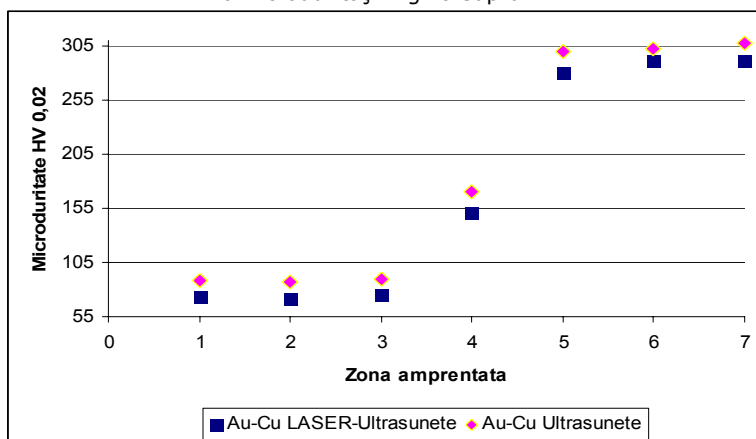
Microduritate HV0,02, cuplul Cupru-Cupru							
Nr. zonei de încercare	1	2	3	4	5	6	7
Laser-Ultrasunete	75	71	74	75	88	90	89
Ultrasunete	85	78	81	84	96	97	96
Microduritate HV0,02, cuplul Argint-Cupru							
Nr. zonei de încercare	1	2	3	4	5	6	7
Laser-Ultrasunete	70,71	79,17	80,68	120,7	155,8	175,81	180,56
Ultrasunete	77,71	85,58	90,24	133,57	168,67	185,78	190,34
Microduritate HV0,02, cuplul Aur-Cupru							
Nr. zonei de încercare	1	2	3	4	5	6	7
Laser-Ultrasunete	72,63	71,08	75,53	150,73	280,12	290,14	290,84
Ultrasunete	88,68	87,29	90,14	170,2	299,31	302,05	307,51



a. Microdurități Cupru-Cupru



b. Microdurități Argint-Cupru



c. Microdurități Aur-Cupru

Figura 8.58 Zonele de amprentare a celor 3 cupluri de materiale

Valorile de microdurate determinate prin măsurare evidențiază în zona de îmbinare o duritate intermediară celor două materiale de bază. În cazul cuplurilor Cu-Cu valorile microdurate sunt similare celor ale materialelor de bază. Din rezultatele obținute se observă faptul că între cele două procedee există diferențe în ceea ce privește durificarea materialului de bază și al materialului îmbinării.

Duritatea probelor îmbinate prin procedeul hibrid este în toate cazurile mai mică decât cea specifică probelor sudate cu ultrasunete. În concluzie, analizând rezultatele experimentărilor se pot considera următoarele influențe ale parametrilor tehnologici ai procesului de microîmbinare asupra caracteristicilor microîmbinărilor realizate:

- puterea pulsului Laser, timpul de încălzire și forța de apăsare influențează pregnant temperatura maximă la care ajunge zona de microîmbinare
- frecvența de vibrație ultrasonoră influențează la rândul ei temperatura maximă, însă influența este mai mică decât influențele parametrilor amintiți anterior.
- o altă diferență observată între influențele frecvenței de vibrație utilizate pentru creșterea temperaturii de îmbinare și influențele celorlalți parametri constă în durata fazei de răcire; frecvența oscilației ultrasonore mărește atât temperatura, cât și viteza de răcire, comparativ cu timpul de încălzire, de exemplu, care asigură o răcire mai lentă a microîmbinării
- forțele de apăsare prea mari pot produce străpungeri sau ruperi ale elementelor supuse îmbinării, fie ele folii sau sârme
- o temperatură de preîncălzire mai mare plastefiază mai bine materialul facilitând procesul ulterior de microîmbinare propriu-zisă
- o reducere a timpului de preîncălzire pentru o aceeași temperatură de preîncălzire este posibilă numai mărinđ puterea pulsului Laser.
- toate microîmbinările prezintă aspecte macroscopice și microscopice corespunzătoare. Influențe negative pot fi întâlnite numai în cazul unei pregătiri necorespunzătoare a suprafețelor care participă la îmbinare.
- Încercările de tracțiune au evidențiat faptul că îmbinarea propriu-zisă este mai rezistentă decât materialele de bază, ruperea microîmbinărilor având loc numai în materialul de bază[80]
- Valorile de microdurate la cuplul de microîmbinări: Cu-Cu, Ag-Cu, Au-Cu obținute prin procedeul hibrid Laser-Ultrasunete, sunt mai mici decât valorile microdurate obținute prin procedeul simplu de microîmbinare cu ultrasunete.
- Valorile microdurate fiind mai mici la procedeul de microîmbinare hibridă Laser-Ultrasunete, implică o reducere a pericolului apariției constituenților fragili în zona microîmbinării, respectiv pericolul apariției fisurilor sau al altor defecte.

9. Conceperea unui cap activ de microîmbinare hibridă Laser-Ultrasunete

Simplu de aplicat, relativ accesibil, universal din punct de vedere al utilizării materialelor de bază (dimensiuni în gama 0...200 μ m) procedeul de microîmbinare termosonică este în prezent mai des aplicat în zona de ambalare a dispozitivelor electromecanice MEMS, deci pe materiale polimerice. În capitolele precedente au fost definite principalele influențe din acest sistem de îmbinare. În continuare se propune dezvoltarea unui cap activ pentru îmbinarea termosonică bazat pe interacțiunea ultrasunete - Laser care să poată fi utilizat la îmbinarea contactelor electrice, aplicație larg răspândită în prezent. Această cercetare conchide toate concluziile cercetărilor derulate până în prezent.

Experimentările efectuate cu procedeul de microîmbinare termosonică au evidențiat faptul că, utilizând două surse termice independente și poziționate distinct spațial efectul hibrid este greu de obținut. Această stare de fapt se datorează imposibilității de poziționare relativă precisă a surselor, astfel încât acestea să acționeze pe o aceeași suprafață de material având dimensiuni mici. Din acest motiv una dintre direcțiile de cercetare abordate în cadrul prezentei teze este de dezvoltare a unui cap de microîmbinare hibridă ultrasunete-Laser, utilizabil atât pentru microîmbinarea a două folii, cât și pentru microîmbinarea unui fir pe o folie, acesta fiind astfel conceput încât să concentreze cele două surse termice pe o suprafață specifică microîmbinării ce se dorește a fi realizată.

O a doua condiție pusă în conceperea capului de îmbinare este necesitatea realizării acestuia într-o construcție modulară care să permită înlocuirea ușoară a componentelor uzate. În al treilea rând, capul de microîmbinare hibridă trebuie să se poată monta fie direct pe post de sonotrodă, fie ca și componentă activă a unei sonotrode modulare deja existente.

9.1 Analiza condițiilor de funcționare a capului activ

Dezvoltarea procedurii de microîmbinare termosonică este rezultatul necesității îmbunătățirii productivității procesului de îmbinare cu ultrasunete. Empiric, s-a ajuns la concluzia că, pentru a mări viteza de realizare a microîmbinării, fără riscul de a distruge eventualele componente învecinate prin vibrare îndelungată, este necesară o intervenție termică suplimentară care să îmbunătățească condițiile în care se derulează procesul de microîmbinare cu ultrasunete. Intervenția constă în aducerea materialului într-o stare în care îmbinarea sa să devină posibilă prin aplicarea unei energii termice suplimentare. Așadar, energia calorică suplimentară are drept scop numai pregătirea zonei de sudare și o susținere a energiei de lucru aduse în zonă prin frecare mecanică. Rolul principal în proces îl deține energia oferită de vibrația ultrasonoră. În plus, aceasta mai rezolvă o problemă specifică proceselor de microîmbinare: ea dispersează elementele care contaminatează suprafețele de îmbinare ale materialelor de bază. După cum s-a prezentat în capitolele anterioare, există două variante principale ale procesului de microîmbinare termosonică: microîmbinarea în pană și microîmbinarea cu bilă. Cea mai des întâlnită variantă, dintre cele două, este microîmbinarea în pană (figura 9.1).



Figura 9.1 Microîmbinări în pană ale firelor din aur pe contacte din același material

Vibrația ultrasonoră este creată și transmisă zonei de îmbinare de către un dispozitiv asemănător celui prezentat în figura 9.2.

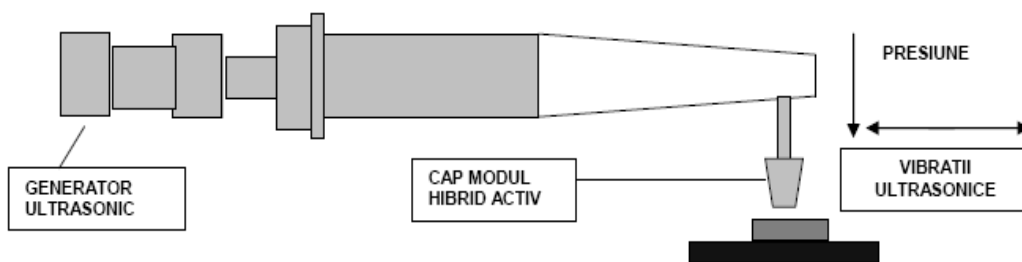


Figura 9.2 Instalație pentru microîmbinare termosonică utilizând un cap activ hibrid modular[38]

Vibrația axială obținută cu ajutorul elementului piezoelectric de acționare este transmis și amplificat de către pâlnia în formă de con. Unda este convertită în vibrații flexurale în capilarul pentru îmbinare, fiind apoi transmisă interfeței pentru îmbinare în timpul unui proces de transmitere a energiei. Așadar, sub influența unui mediu de energie ultrasonică (temperatură și presiune strict controlate) atomii marginali ai suprafețelor aflate în contact intim (datorită forței de apăsare) ale celor două materiale de bază vor difuza dinspre un material înspre celălalt, creând astfel condițiile formării unei legături bazate pe forțele interatomice. Toate acestea au loc la o temperatură de aproximativ 100°C în cazul neferoaselor și de aproximativ 300°C în cazul oțelurilor. Atingerea acestor temperaturi este posibilă prin utilizarea unei surse termice suplimentare care intervine înaintea începerii procesului propriu-zis de îmbinare. Acțiunea sursei termice continuă și în timpul procesului de îmbinare, creând împreună cu sursa ultrasonică un complex hibrid care creează condițiile formării îmbinării dorite.

9.2 Conceperea soluției constructive pentru capul hibrid de microîmbinare Ultrasunete-Laser

Pornind de la condițiile descrise anterior se concepe o soluție constructivă pentru capul hibrid dedicat îmbinării termosonice ultrasunete-Laser. Concepția se referă la un cap activ atașabil unei sonotrode, cap ce are un caracter hibrid prin alăturarea a două surse de energie distincte (vibrație ultrasonică - energie cinetică, fasciculul Laser-energie calorică).[79],[82].

Schema de principiu a capului activ hibrid pentru sonotrode este prezentat în figura 9.3.

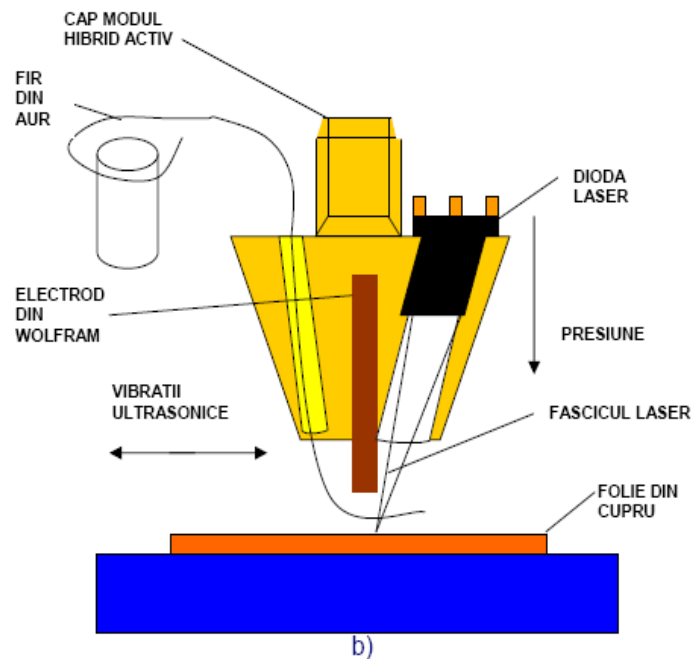


Figura 9.3 Structura capului activ modular

Părțile componente ale capului hibrid activ sunt prezentate detaliat în figura 9.4

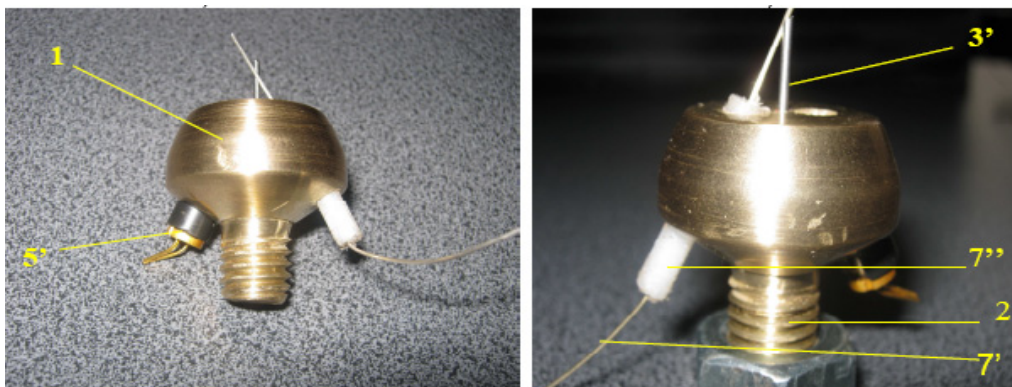


Figura 9.4 Modul cap activ sonotrodă, [79]

Capul activ hibrid pentru sonotroda, realizat în construcție modulară, este compus dintr-un corp (1) confecționat dintr-un aliaj accesibil (oțel, oțel inoxidabil sau alamă). Corpul capului activ este prevăzut cu un sistem de asamblare demontabilă (cu filet), (2). Corpul capului activ este prevăzut cu 3 orificii, două străpunse și unul nestrăpuns, pentru asigurarea celor trei funcții principale:

- aplicarea vibrației ultrasonice cu ajutorul unui pin de atac.
- preîncălzirea materialelor de bază cu ajutorul unui fascicul Laser
- ghidarea materialului de adaos către zona de îmbinare.

În același timp, este realizată și o funcție secundară: sprijinirea pinului de atac pentru evitarea deformării locale a corpului capului activ.

Orificiul pentru montarea pinului de atac (3) este nepătruns și are diametrul în funcție de diametrul pinului de atac. Pinul de atac (3'), primul element din structura hibridă, cu participare activă în procesul de îmbinare (aport de energie cinetică) are rolul de a transmite vibrația de la sonotrodă către materialele de bază simultan cu transmiterea forței necesare realizării microîmbinării. Pinul de atac este confecționat din wolfram sau din aliaj de wolfram cu thoriu, zirconiu, sau pamânturi rare, astfel încât să suporte încărcările mecanice specifice procesului de îmbinare (pentru microîmbinări este suficient wolframul pur, pentru îmbinări pe materiale de bază cu grosime cuprinsă între 0,3...0,7 mm fiind uneori necesară alierea wolframului cu elementele specificate anterior, [79]). Capătul liber al pinului este prelucrat prin așchiere la forma tronconică, diametrul de capăt fiind identic cu diametrul firelor care se îmbină sau egal cu 1,0...1,5x grosimea foliei metalice substrat. Lungimea pinului de atac este egală cu (4+lungimea orificiului pinului) mm. Pinul de wolfram este sprijinit pe un bolț dintr-un material cu duritate mai mare decât duritatea materialului corpului capului activ, [82]. Dioda laser (5') este cel de-al doilea element al sistemului hibrid de îmbinare aducând aport de energie calorică destinată preîncălzirii materialelor de bază. Având puteri cuprinse între 200...500 mV (în funcție de natura și grosimea materialelor de bază) dioda Laser asigură încălzirea materialelor de bază la temperaturi cuprinse între 150...200°C.

Pentru montarea diodei Laser se prelucrează un orificiu pătruns (5) sub un unghi de 30°, astfel încât fasciculul să intersecteze axa pinului de atac la aproximativ 0,5...1,5 mm înaintea capătului liber al acestuia. Fixarea diodei Laser se face prin lipire pe suprafața de maxim 1mm x 1mm. Pentru grosimi ale materialului de bază mai mari 0,3 mm, în fața fasciculului se montează o lentilă (6) pentru o focalizare suplimentară. Pentru introducerea sub pinul de atac a materialului de adaos, corpul capului hibrid este prevăzut cu un orificiu destinat acestuia (7). Firele folosite drept material de bază sunt confecționate din materiale relativ moi (aur, argint, cupru) având diametre cuprinse între 0,2...0,5mm. Din aceste motive transportarea lor printr-un simplu orificiu prelucrat într-un material metalic mai dur ar putea conduce la deformarea acestora și eventuala lor blocare în interiorul orificiului. În vederea evitării acestor fenomene, în interiorul orificiului se va introduce un tub din teflon (7''), astfel încât coeficientul de frecare dintre fir și orificiu să fie redus la minim. Tubul de ghidare din teflon are diametrul interior cu 10...20 % mai mare decât diametrul firului. Poziționarea orificiului cu tubul de ghidare se face tot sub un unghi de 30°, astfel încât capătul liber al firului să se intersecteze cu axa pinului de wolfram la aproximativ 1mm în fața vârfului acestuia. Capul activ hibrid, în structura propusă, în ansamblu cu orice tip de sonotrodă, este destinat îmbinării / microîmbinării firelor cu dimensiuni mai mici de 0,7 mm, foliilor metalice cu grosimi mai mici de 0,7 mm precum și îmbinărilor și microîmbinărilor firelor pe folii metalice.

9.3 Verificarea capului activ modular pentru microîmbinare termosonică

Dupa realizarea efectivă a capului de îmbinare pentru verificarea acestuia sunt efectuate o serie de microîmbinări termosonice Laser -Ultrasunete a unor folii din cupru și aluminiu. Astfel, se execută microîmbinări pe trei cupluri de materiale îmbinate prin suprapunere în puncte: aluminiu-aluminiu, aluminiu-cupru și cupru-cupru. Capul activ conceput este asamblat (îmbinare filetată) pe un corp de sonotrodă proiectat și realizat în Institutul Național de Cercetare în Sudură ISIM Timișoara.. În figura 9.5 este prezentat ansamblul cap hibrid activ - sonotrodă.

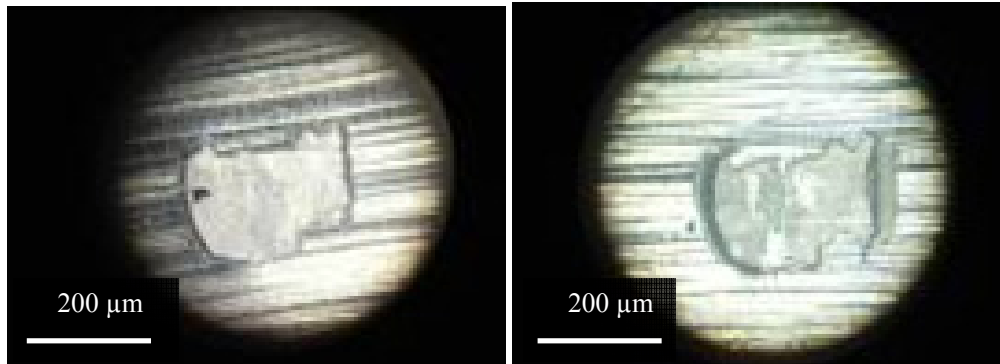


Figura 9.5 Ansamblul cap activ - sonotrodă

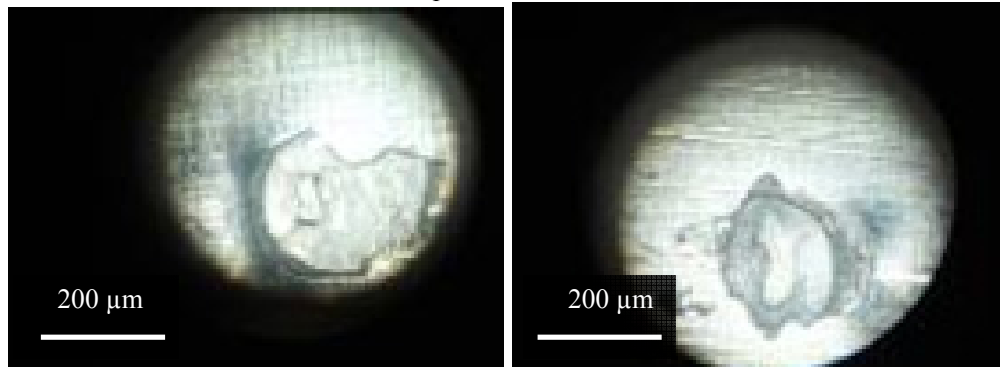
În tabelul 9.1 sunt prezentați parametrii folosiți la microîmbinarea prin suprapunere în puncte a cuplurilor de folii: Al/Al, Al/Cu și Cu/Cu, precum și imaginile mărite la un microscop optic ce reprezintă punctul de îmbinare dintre cele două componente. În acest tabel se află câte 5 probe de microîmbinări, la fiecare tabel un parametru este variabil, ceilalți sunt constanți, modificându-se doar temperatura totală a procesului de microîmbinare. Se observă, că temperatura maximă se modifică în funcție de valoarea amplitudinii, de timpul de activare cu ultrasunete și de presiunea exercitată pe componente.

Tabel 9.1 Parametrii microîmbinare hibridă Ultrasunete-Laser folii de aluminiu-aluminiu (130/400 μm), aluminiu-cupru (130/400 μm) și cupru-cupru (120/400 μm)

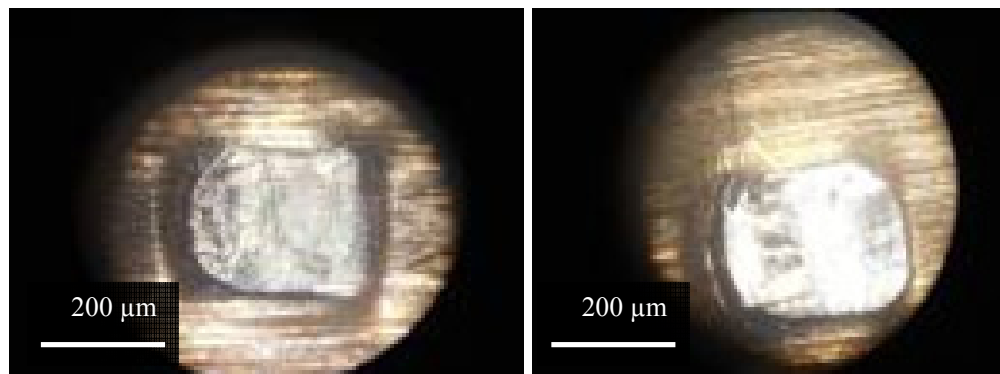
Putere Dioda Laser [mW]	Curent Dioda Laser [mA]	Tensiune dioda Laser [V]	Temp. Pre încălzire [°C]	Presiunea [N/mm ²]	Timp US [s]	Amplit. [μm]	Temp. maximă [°C]
<i>Cuplu Aluminiu-Aluminiu</i>							
200	520	5,5	70	0,12	0,75	7	130
200	520	5,5	70	0,12	0,75	7,5	135
200	520	5,5	70	0,12	0,75	8	142
200	520	5,5	70	0,12	0,75	8,5	145
200	520	5,5	70	0,12	0,75	9	150
200	520	5,5	70	0,12	0,75	8	140
200	520	5,5	70	0,12	0,80	8	145
200	520	5,5	70	0,12	0,84	8	152
200	520	5,5	70	0,12	0,88	8	155
200	520	5,5	70	0,12	0,93	8	160
200	520	5,5	70	0,05	0,8	8,5	150
200	520	5,5	70	0,11	0,8	8,5	155
200	520	5,5	70	0,11	0,8	8,5	160
200	520	5,5	70	0,12	0,8	8,5	160
200	520	5,5	70	0,13	0,8	8,5	164
<i>Cuplu Aluminiu-Cupru</i>							
200	520	5,5	70	0,1	0,8	8,5	143
200	520	5,5	70	0,1	0,8	8,8	148
200	520	5,5	70	0,1	0,8	9	155
200	520	5,5	70	0,1	0,8	9,3	158
200	520	5,5	70	0,1	0,8	9,6	160
200	520	5,5	70	0,1	0,48	7,5	105
200	520	5,5	70	0,1	0,50	7,5	108
200	520	5,5	70	0,1	0,52	7,5	113
200	520	5,5	70	0,1	0,55	7,5	119
200	520	5,5	70	0,1	0,58	7,5	125
200	520	5,5	70	0,05	0,55	7,8	90
200	520	5,5	70	0,075	0,55	7,8	95
200	520	5,5	70	0,1	0,55	7,8	100
200	520	5,5	70	0,11	0,55	7,8	105
200	520	5,5	70	0,13	0,55	7,8	125
<i>Cuplu Cupru-Cupru</i>							
200	520	5,5	70	0,1	0,5	7	125
200	520	5,5	70	0,1	0,5	7,3	130
200	520	5,5	70	0,1	0,5	7,5	134
200	520	5,5	70	0,1	0,5	7,8	139
200	520	5,5	70	0,1	0,5	8	146
200	520	5,5	70	0,1	0,45	8	130
200	520	5,5	70	0,1	0,50	8	135
200	520	5,5	70	0,1	0,55	8	140
200	520	5,5	70	0,1	0,60	8	147
200	520	5,5	70	0,1	0,65	8	150
200	520	5,5	70	0,05	0,7	8,5	110
200	520	5,5	70	0,08	0,7	8,5	115
200	520	5,5	70	0,1	0,7	8,5	120
200	520	5,5	70	0,11	0,7	8,5	125
200	520	5,5	70	0,12	0,7	8,5	130



a. Cuplu Aluminiu-Aluminiu



b. Cuplu Aluminiu-Cupru

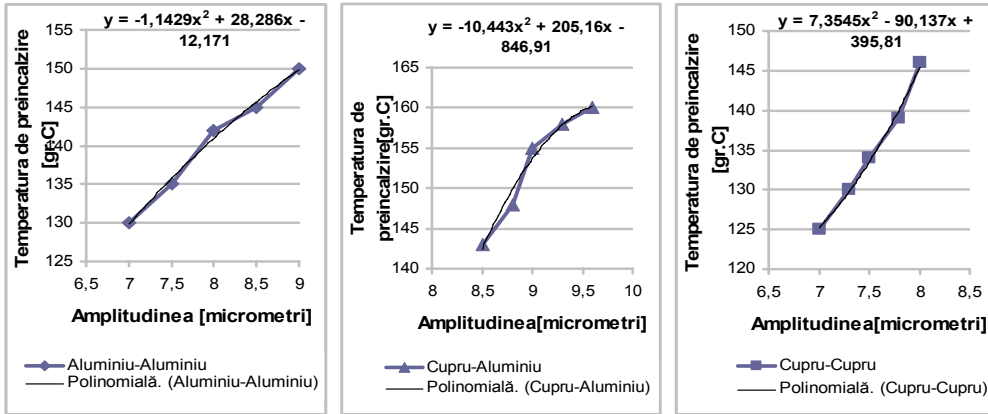


c. Cuplu Cupru-Cupru

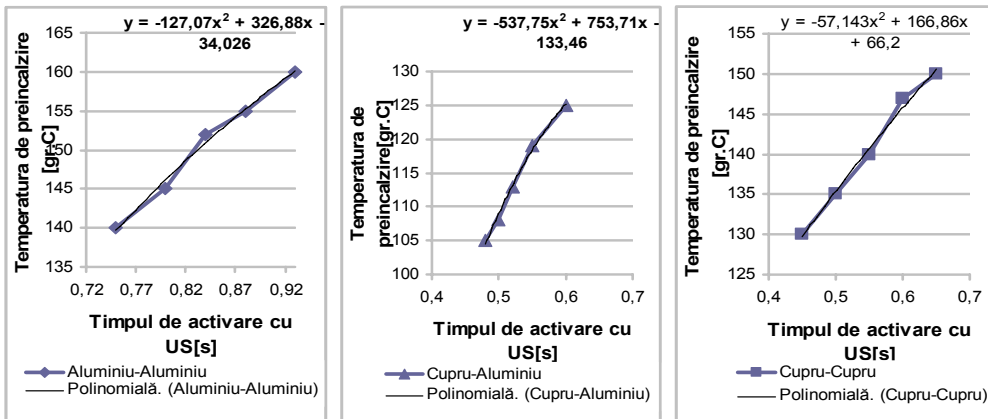
Figura 9.6 Tipuri de microîmbinare hibrid Laser - Ultrasunete a foliilor Al-Al, Al-Cu și Cu-Cu, utilizând capul activ conceput și realizat

Datorită diametrului redus al pinului de wolfram ($\Phi = 1\text{mm}$) este dificil să se execute striații pe capul frontal. Se observă din figura 9.6 că amprenta nu prezintă urme pe componentele de îmbinat. Eventualele optimizări ulterioare trebuie să țină seama și de posibilitatea realizării de striații prin procedee de micro-prelucrare neconvenționale. În figurile 9.7 a,b,c sunt prezentate influențele

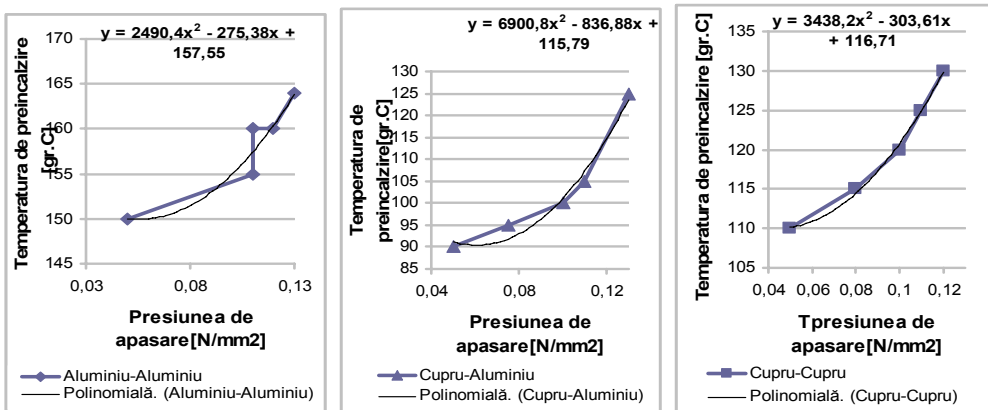
parametrilor de îmbinare asupra temperaturii maxime în zona microîmbinării, influențe evidențiate în timpul experimentărilor de verificare a capului activ



a. Influența amplitudinii vibrației ultrasonice asupra temperaturii maxime



b. Influența timpului de aplicare a vibrației ultrasonice asupra temperaturii maxime



c. Influența presiunii asupra temperaturii maxime

Figura 9.7 Influențele amplitudinii, timpului de activare și a presiunii asupra temperaturii maxime obținute în zona de îmbinare

Din graficele din figura 9.7a se observă o influență a amplitudinii vibrațiilor ultrasonice asupra temperaturii maxime obținute. Cu cât amplitudinea vibrațiilor crește, cu atât temperatura maximă este mai mare. De asemenea timpul de activare cu ultrasunete al celor 3 cupluri de materiale îmbinate cu cât este mai îndelungat cu atât temperatura maximă obținută este mai mare. Presiunea de apăsare cu cât este mai mare, amplitudinea vibrațiilor este mai mică, iar temperatura maximă rezultată este mai mare. Ecuațiile de regresie statistică sunt ecuații polinomiale de gradul 2:

1 Microîmbinări Aluminu-Aluminu

$$T = -1,1429 A^2 + 28,286A - 12,171 \quad (9.1)$$

$$T = -127,07 t^2 + 326,88 t - 34,026 \quad (9.2)$$

$$T = 2490,4 p^2 - 275,38 p + 157,55 \quad (9.3)$$

2 Microîmbinări Aluminu-Cupru

$$T = -10,443A^2 + 205,16A - 846,91 \quad (9.4)$$

$$T = -537 t^2 + 753,71 t - 133,46 \quad (9.5)$$

$$T = 6900,8 p^2 - 836,88 p + 115,79 \quad (9.6)$$

3 Microîmbinări Cupru-Cupru

$$T = 7,354A^2 - 90,137A + 395,81 \quad (9.7)$$

$$T = -57,143 t^2 + 166,86 t + 66,2 \quad (9.8)$$

$$T = 3438,2p^2 - 303,61p + 116,71 \quad (9.9)$$

În care T = temperatura maximă obținută [$^{\circ}\text{C}$], A - amplitudinea vibrațiilor [μm], p - presiunea de apăsare pe componente [N/mm^2] și t - timpul de activare cu ultrasunete [s]

Din fiecare cuplu de microîmbinări sunt prelevate eșantioane care sunt supuse încercării de rupere tehnologică (debutonare) realizate în conformitate cu standardul SR EN ISO:2011

În figurile 9.8 (a, b, c) sunt prezentate câteva dintre rezultatele procesului de încercare. În urma încercării de rupere tehnologică (debutonare) a microîmbinărilor prezentate din figurile amintite, se observă că ruperea sau debutonarea se realizează în materialul de bază MB, în jurul sudurii. Aceasta indică faptul că îmbinarea propriu-zisă prezintă o rezistență mecanică superioară celei a materialului de bază. În cazul cuplurilor disimilare cupru-aluminu, materialul de bază fisurat în timpul încercării tehnologice de debutonare este aluminu. În cazul îmbinărilor similare, conform așteptărilor, rezistența mecanică a îmbinării este mai mare decât cea a celui mai subțire material de bază.

Forțele de rupere sunt similare celor întâlnite la probele realizate prin procedeul termosonic și supuse încercării de tracțiune.

Rezultatele obținute confirmă realizarea unor microîmbinări de bună calitate cu o rezistență la rupere tehnologică corespunzătoare. Pentru microîmbinarea firelor pe folii este necesară dotarea acestuia cu un mini derulator de bobine de fire calculat pentru dimensiunile de fir dorit a fi utilizat. Concepția capului activ s-a dovedit a fi corespunzătoare, îmbinările realizate având o bună rezistență mecanică

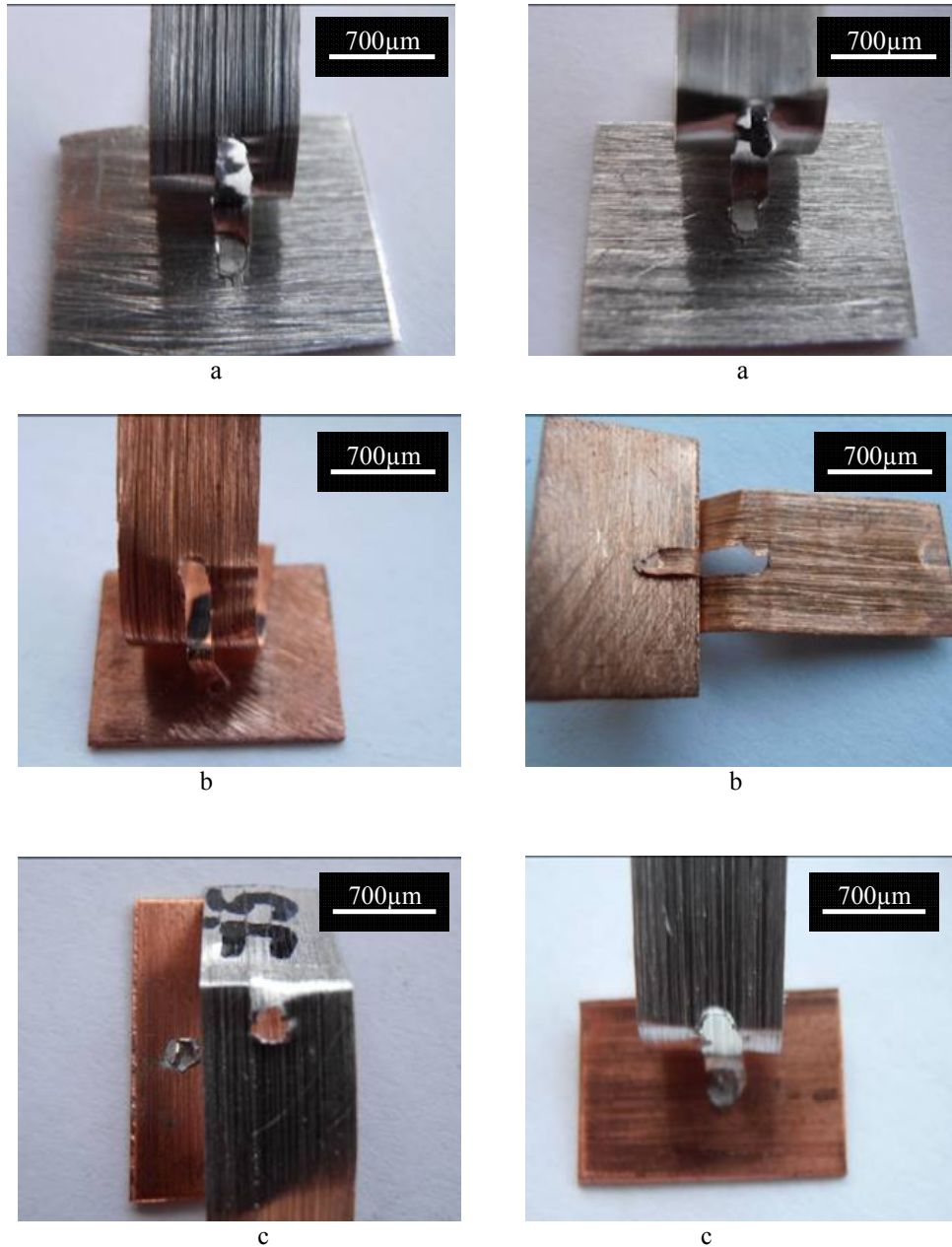


Figura 9.8 Debutonarea microîmbinărilor realizate din folii: Aluminiu/Aluminiu (a), Cupru/Cupru (b) și Cupru/Aluminiu(c)

9.4 Examinare microscopică

În cadrul examinărilor de microscopie optică se analizează câte 3 probe de microîmbinări din aluminiu și 3 probe de microîmbinări din cupru. Atacul probelor din aluminiu se realizează cu o soluție de hidroxid de nitru în concentrație de 5%, iar cele din cupru cu oxid cuprat amoniacal. Mărimea de observare a probelor prin microscopie optică este de 100 ori. Pentru a facilita o comparație riguroasă se prezintă pentru fiecare probă o imagine cu aspectul microstructural din materialul de bază și o imagine microstructurală din interiorul microîmbinării termosonice.

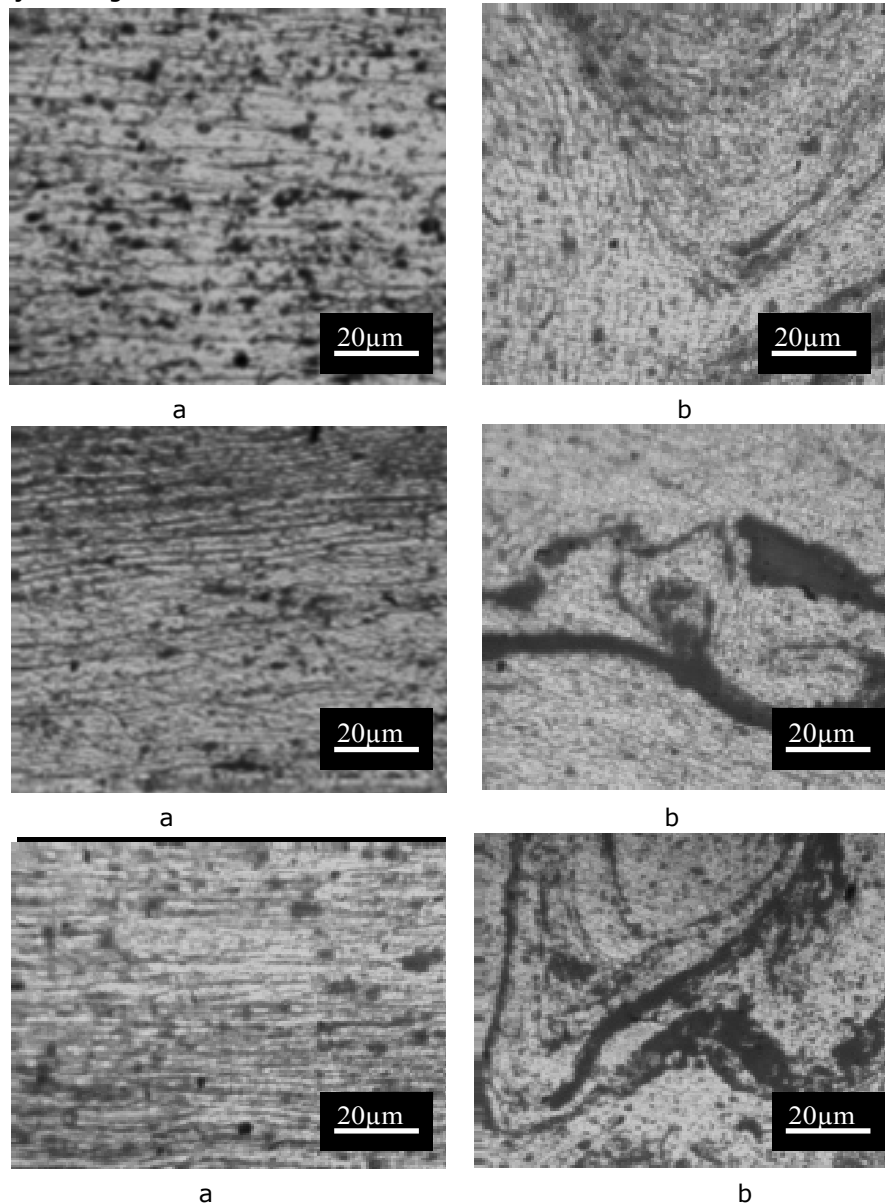


Figura 9.9 Imagini microstructurale: a) folii aluminiu(MB) și b) nucleu microîmbinare termosonică

Probele de aluminiu îmbinate au o structură formată din soluție solidă Al-a cu grăunți puternic deformați pe direcția de laminare a foliei în materialul de bază(MB), iar în zona îmbinată termosonic structura are un aspect modificat privind orientarea(distorsiuni) și mărimea grăunților cristalini (mai mari sau mai fini).

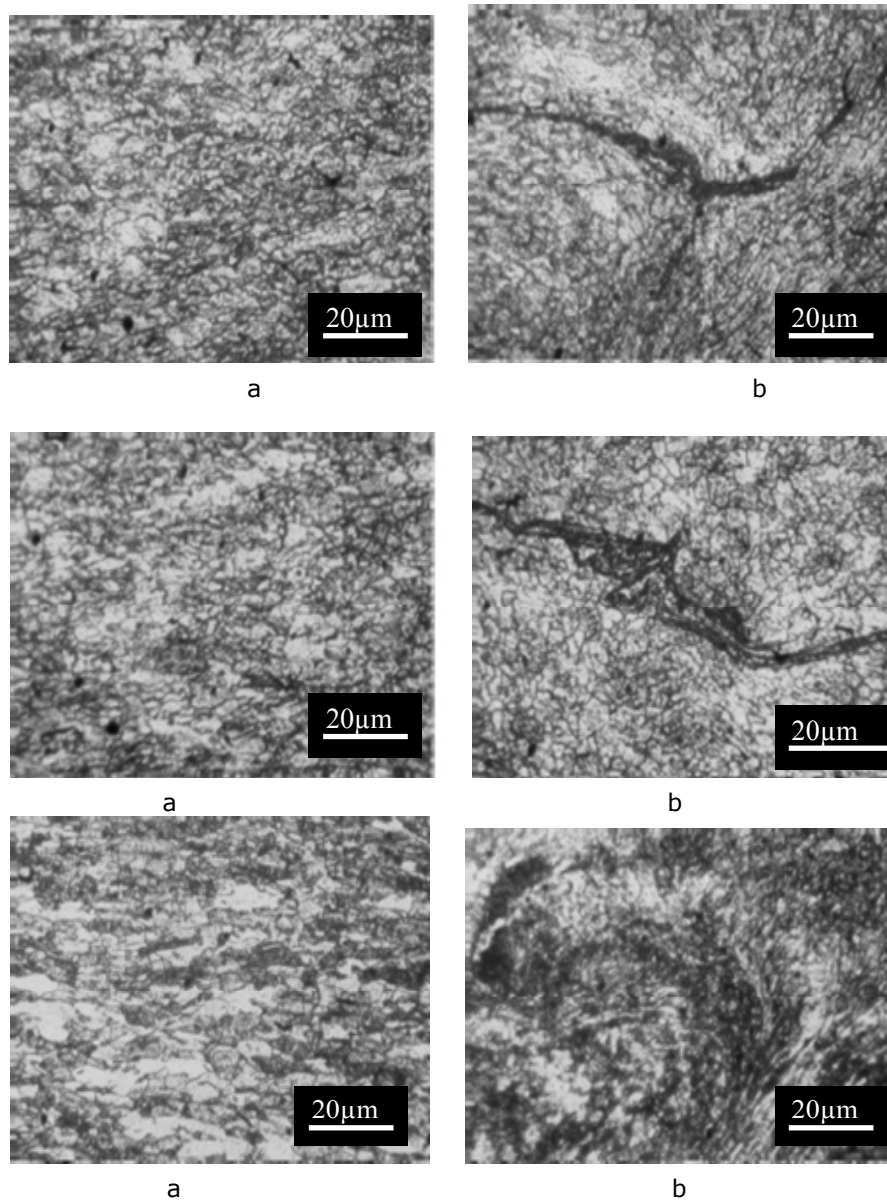


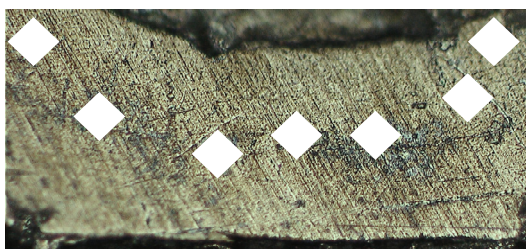
Figura 9.10 Imagini microstructurale: a) folii cupru (MB) și b) microîmbinare termosonică

Probele din folii din cupru prezentate au o structură formată din soluție solidă Cu- a cu grăunți echiaxiali orientați pe direcția de laminare, incluziuni globulare, de Cu_2O în materialul de bază(MB), iar în interiorul microîmbinării

structura are un aspect modificat privind orientarea. Grăunții cristalini din interiorul microîmbinării sunt mai fini și au o formă alungită. Sunt evidente aglomerările de Cu₂O orientate după direcțiile de deformare în nucleul de microîmbinare

9.5 Încercări de microduritate Vickers - HV 0,02

Se prezintă în continuare determinări de microdurități HV 0,02 la probele îmbinate prin procedeul hibrid Laser Ultrasunete cu ajutorul capului activ modular conceput pentru cele 3 cupluri de materiale: aluminiu-aluminiu, aluminiu-cupru și cupru-cupru. În figura 9.11 sunt prezentate zonele de amprentare a microdurităților la cuplul de folii: Al-Al



MB1-AL ZIT1-AL TS*-1 TS-2 TS-3 ZIT2-AL MB2-AL

Figura 9.11 Zonele de amprentare de obținere microdurități cuplul: aluminiu- aluminiu

Tabel 9.2 Probe microîmbinare termosonică hibridă Laser-Ultrasunete:Al-Al

Microduritate Vickers HV 0,02							
PROBA	MB1-AL	ZIT1-AL	TS*-1	TS-2	TS-3	ZIT2-AL	MB2-AL
1	42,1	38,2	35,7	37	35,1	42,1	42,9
2	38,3	39,1	36,5	34,8	32,7	37,6	40,5
3	39,5	36,3	34,8	30,9	34,2	35,4	38
4	43,6	37,5	32,7	34,2	41,3	41,2	35,9

* TermoSonic

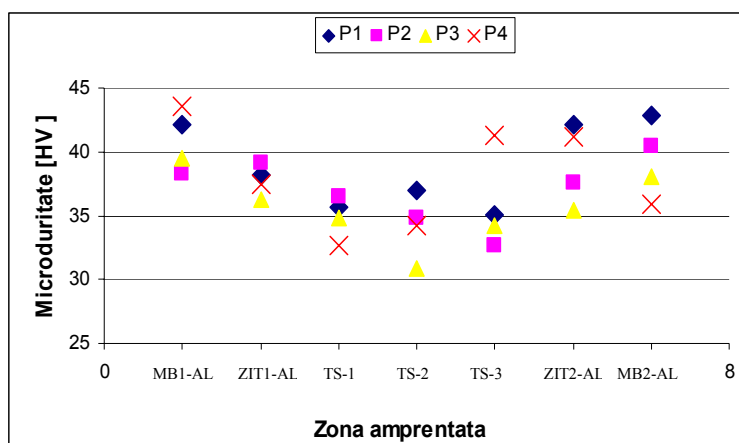
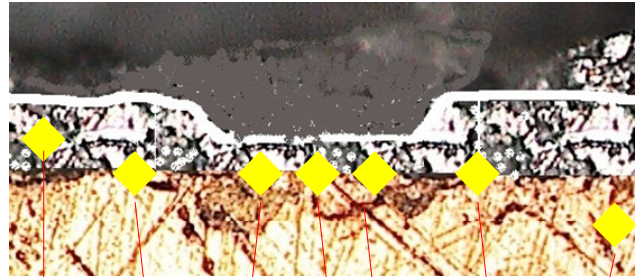


Figura 9.12 Evoluția microdurităților la îmbinarea termosonică folii Al-Al

În figura 9.13 sunt prezentate zonele de amprentare a microdurității cuplului de materiale Al-Cu îmbinate prin procedeu hibrid Laser-Ultrasunete



MB1-AL ZIT1 TS*-1 TS-2 TS-3 ZIT2 MB2-Cu

Figura 9.13 Zonele de amprentare de obținere microdurități cuplul: aluminiu- cupru

Tabel 9.3 Probe microîmbinare termosonica hibrida Laser-Ultrasunete:Al-Cu

Microduritate Vickers HV 0,02							
PROBA	MB1-AL	ZIT1	TS*-1	TS-2	TS-3	ZIT2	MB2-Cu
5	42,1	48,4	54,05	51,75	50,4	71,2	85
6	38,3	45,2	54,45	51,05	52,4	75,6	92,3
7	39,5	46,5	51,85	51,65	53,6	73,2	79
8	43,6	48,3	53,5	52,64	54,34	69,7	81

* TermoSonic

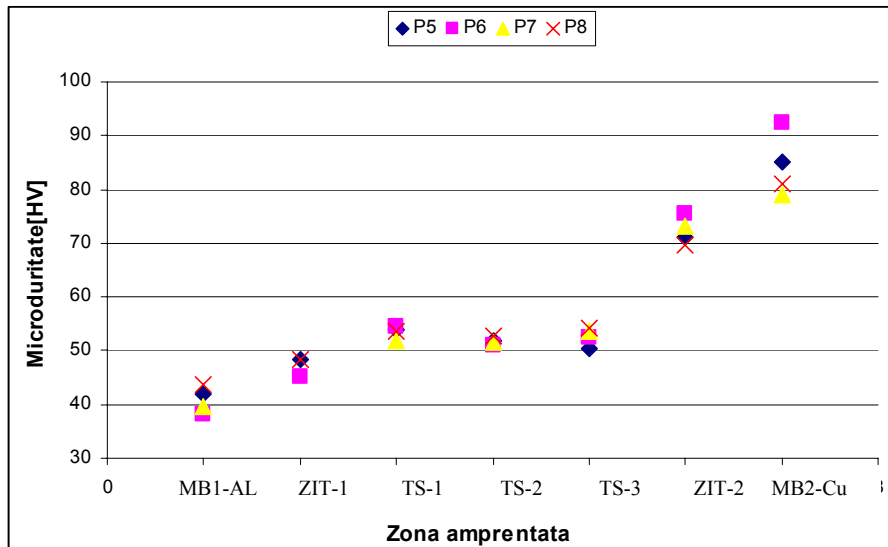
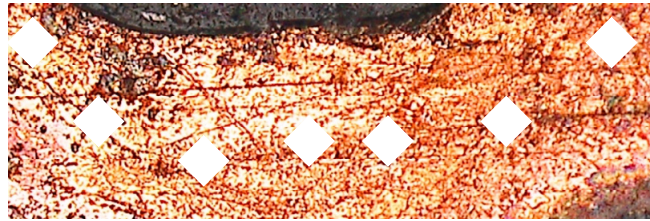


Figura 9.14 Evoluția microdurităților la imbinarea termosonica a foliilor Al-Cu

În figura 9.15 sunt prezentate zonele de amprentare a microdurității cuplului de materiale Cu-Cu îmbinate prin procedeul hibrid Laser-Ultrasunete



MB1-Cu ZIT1-Cu TS1 TS2 TS3 ZIT2-Cu MB2-Cu

Figura 9.15 Zonele de amprentare de obținere microdurității cuplul: Cupru-Cupru

Tabel 9.4 Probe microîmbinare termosonică hibridă Laser-Ultrasunete: Cu-Cu

Microduritate Vickers HV 0,02							
PROBA	MB1-Cu	ZIT1-Cu	TS*-1	TS-2	TS-3	ZIT2-Cu	MB2-Cu
9	85	70,3	72,4	66,5	72,4	84,3	90,7
10	92,3	77,6	72,4	67,3	76,2	86,4	97,4
11	79	80,2	68,9	72,4	67,3	74,5	89,4
12	81	85,3	74,3	71,5	70,7	81,2	94,6

* Termosonic

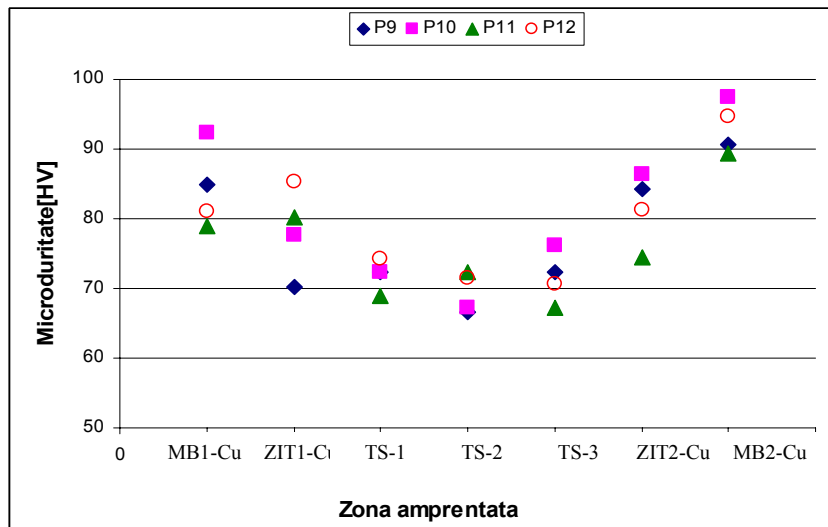


Figura 9.16 Evoluția microdurităților la îmbinarea termosonică a foliilor Cu-Cu

9.6 Concluzii

- Capul hibrid de microîmbinare Laser-Ultrasunete conceput are un avantaj deosebit deoarece ambele surse de energie termică și energie cinetică se află apropiate una de alta
- Capul activ conceput este indicat pentru microîmbinarea materialelor metalice și nemetalice pentru dimensiuni de ordinul micronilor în realizarea îmbinărilor și încapsularea microdispozitivelor electromecanice MEMS.
- Microduritățile aplicate în nucleul îmbinărilor realizate cu capul activ conceput pentru cele 3 cupluri de materiale sunt ca valoare mai mici decât valorile microdurităților realizate în materialul de bază și în zonele influențate termic, ceea ce denotă că microstrucurile din interiorul nucleului implică o reducere a pericolului apariției constituenților fragili în zona microîmbinării, respectiv pericolul apariției fisurilor sau al altor defecte.
- Rezultatele ruperii tehnologice a probelor din folii a demonstrat faptul ca debutonarea s-a realizat corespunzator, ca cele arătate din figurile anterioare, deci din punct de vedere al rezistenței de rupere sunt probe corespunzătoare
- Prin adiționarea sursei termice cu ajutorul fasciculului Laser de la o diodă, s-a demonstrat că difuzia componentelor este mult îmbunătățită așa cum s-a arătat la examinarea micrografică a îmbinării componentelor.
- Un mare avantaj la acest cap hibrid modular este posibilitatea de înlocuire a pinului de wolfram după ce se uzează, de asemenea posibilitatea capului hibrid de a se asambla la o altă sonotrodă.

În final s-a realizat calculul economic al probelor tip folie cu suprafața activă de 1,00 x 5,00 mm îmbinate prin suprapunere cu ajutorul celor 3 procedee de microîmbinare, cu sau fără MA fiind prezentat în ANEXA 1.

10. Concluzii, contribuții personale și direcții de cercetare pentru viitor

10.1 Concluzii

10.1.1 Concluzii privind cercetarea documentară

La baza tezei a stat cercetarea literaturii de specialitate, în acest sens, fiind consultate 113 referințe bibliografice de dată recentă (din ultimii 5 ani).

Cercetarea literaturii de specialitate evidențiază faptul că cele trei tipuri de microîmbinări studiate: microîmbinarea eutectică, microîmbinarea prin topire cu fascicul Laser și microîmbinarea termosonică, sunt procedee de îmbinare/microîmbinare a componentelor microdispozitivelor electromecanice MEMS, ce sunt întâlnite frecvent având o aplicabilitate avansată în industria electrică și electronică, în industria automobilelor, și mai ales în industria echipamentelor medicale și aerospațiale. În urma cercetărilor documentare efectuate, se concluzionează faptul că procesul nou de microîmbinare hibridă Ultrasunete-Laser Cristal, este într-o fază incipientă a cercetării, majoritatea lucrărilor științifice fiind orientate cu precădere către cele trei procedee studiate și analizate.

Această concluzie a condus la decizia de abordare în vederea studierii a procesului de microîmbinare termosonică hibridă Ultrasunete-Laser Cristal, cercetarea fiind orientată cu predilecție către parametrii ce influențează atât preîncălzirea componentelor cu fascicul Laser Cristal, cât și parametrii de producere a ultrasunetelor.

În cazul procesului nou de microîmbinare hibridă Ultrasunete-Laser Cristal, parametrii cu influență puternică sunt:

- Parametrii de proces: puterea pulsului, durata pulsului, frecvența pulsului, energia, puterea medie, temperatura pulsului la preîncălzire, forța de apăsare a sonotrodei pe componente, timpul de activare cu ultrasunete, amplitudinea vibrațiilor ultrasonice și temperatura maximă a microîmbinării la contactul cap de antrenare/îmbinare-componente.
- Parametrii de sistem: parametrii geometrici de poziționare relativă a capului de preîncălzire cu fascicul Laser Cristal, parametrii de dispozitivare și poziționare al corpului sonotrodei și a capului activ al sonotrodei, parametrii geometrici ai capului modular activ proiectat.

Dintre acești parametrii, s-au ales pentru monitorizare, în sensul conceperii proiectării și realizării unui cap activ modular hibrid Ultrasunete-Laser diodă, atât parametrii de proces ai fasciculului Laser pentru preîncălzirea componentelor, cât și parametrii dimensionali ai capului hibrid. Experimentările efectuate în cadrul capitolului 8 au evidențiat faptul că, utilizând două surse termice independente și poziționate distinct spațial, efectul hibrid este greu de obținut. Această stare de fapt, se datorează imposibilității de poziționare relativă precisă, astfel încât cele două surse termice să acționeze pe o aceeași suprafață de dimensiuni mici. Din acest motiv una dintre direcțiile de cercetare abordate în cadrul prezentei teze a fost dezvoltarea unui cap de microîmbinare hibridă ultrasunete-Laser, utilizabil atât pentru microîmbinarea în puncte prin suprapunere a două folii cât și pentru microîmbinarea unui fir pe o folie. O a doua condiție a concepției, a fost modularitatea capului de îmbinare, acesta trebuind să aibă componentele uzabile

inlocuibile ușor, deci o soluție constructivă modulară a fost cea mai recomandată din acest punct de vedere.

În al treilea rând, capul de îmbinare hibridă, a trebuit să fie montat fie direct pe post de sonotrodă, fie pe o sonotrodă existentă deja.

10.1.2 Concluzii privind cercetarea experimentală

- În urma rezultatelor obținute prin încercarea la tracțiune a probelor obținute prin cele 3 procedee de microîmbinare cercetate: eutectică, topire cu fascicul Laser și termosonică, rezultă faptul ca microîmbinările au o rezistență bună la rupere (acestea s-au rupt în materialul de bază), deci nu vor exista probleme în exploatare.
- Încercările la tracțiune (forfecare) au evidențiat faptul ca microîmbinările propriu-zise sunt mai rezistente decât materialul de bază, ruperea având loc numai în MB
- Considerând că rezistența mecanică a microîmbinării cu fascicul Laser a conductorilor din cupru este un criteriu secundar de analiză a îmbinării de tip contact electric, determinat prin faptul că asupra contactului nu acționează forțe importante, nu se consideră oportună efectuarea unor verificări privind nivelul caracteristicilor mecanice ale microîmbinărilor.
- În urma rezultatelor obținute prin măsurarea rezistențelor electrice de contact prin metodele enumerate în capitolele anterioare, la probele obținute prin cele 3 procedee cercetate, au rezultat rezistențe electrice de contact de valori minime sensibil apropiate ca valoare de rezistențele electrice ale componentelor înainte de îmbinare pe aceeași lungime de probă (folie sau conductor)
- În urma rezultatelor obținute a microdurităților efectuate, pe probele obținute prin cele 3 procedee de microîmbinare studiate, rezultă faptul că microduritățile sunt de valori mai mici în zona microîmbinării și valori superioare în zona de influențare termică ZIT și în materialul de bază MB, ceea ce implică un risc scăzut de rupere fragilă a componentelor MEMS în zona microîmbinării.
- Microduritățile obținute la probele efectuate prin procedeul hibrid Laser-Ultrasunete, sunt semnificativ mai mici decât valorile de microdurități obținute la probe efectuate prin procedeul clasic de îmbinare cu ultrasunete, ambele procedee desfășurându-se cu aceeași parametrii de îmbinare.
- Valorile microdurităților obținute prin procedeul hibrid Laser-Ultrasunete fiind mai mici decât valorile microdurităților obținute prin procedeul de îmbinare cu Ultrasunete, implică o reducere a pericolului apariției de constituenți fragili în zona microîmbinării, respectiv pericolul apariției fisurilor sau altor defecte.
- La microîmbinările obținute prin cele 3 procedee cercetate, la încercarea de rupere tehnologică (debutonarea), a rezultat faptul că ruperea materialului s-a realizat în MB și nu în microîmbinarea sudată.
- În urma microstructurilor studiate și analizate, se constată faptul că la microîmbinările între firele din: aur, argint și cupru și folia din cupru,

realizate prin procedeul simplu cu Ultrasunete, microîmbinările au prezentat crăpături, fisuri, în schimb la microîmbinările realizate cu aceeași parametri de îmbinare dar realizate prin procedeul nou hibrid Laser-Ultrasunete, componente la care s-a aplicat o preîncălzire cu fascicul Laser, rezultă din micrografiile cercetate o interdifuzie corespunzătoare a atomilor celor două componente .

10.2 Contribuții personale

În urma finalizării cercetării doctorale au fost obținute o serie de contribuții originale care pot fi grupate în contribuții în domeniul dezvoltării teoretice, respectiv contribuții prin cercetare experimentală. Totodată, au fost concepute și realizate o serie de dispozitive originale pentru microîmbinarea prin procedeele analizate. În continuare se detaliază contribuțiile originale.

10.2.1 Contribuții în domeniul dezvoltării teoretice

- Analiza de regresie statistică a dependențelor dintre forța de rupere și temperatura procesului de microîmbinare eutectică la utilizarea celor 3 aliaje de lipit.
- Analiza de regresie statistică a dependențelor rezistenței mecanice la rupere în funcție de temperatura procesului de îmbinare și aliajul de adaos folosit.
- Analiza de regresie statistică a dependențelor dintre valorile rezistenței electrice și temperatura procesului de îmbinare pentru cazul celor 3 aliaje de lipit.
- Graficul de dependență a rezistențelor electrice și temperatura procesului de îmbinare și diferențele rezistențelor electrice măsurate a probelor neîmbinate cu valorile rezistențelor electrice de contact a probelor îmbinate prin lipire eutectică.
- Analiza de regresie statistică a energiei pulsului Laser față de lățimea și înălțimea pătrunderii la o microîmbinare prin topire cu fascicul Laser a două folii de aluminiu.
- Analiza de regresie statistică a tensiunii față de lățimea și înălțimea pătrunderii la o microîmbinare prin topire cu fascicul Laser a două folii de aluminiu.
- Graficul de influență a distanței de focalizare față de geometria pătrunderii.
- Analiza de regresie statistică ale influențelor puterii pulsului, distanței de focalizare și durată pulsului față de geometria pătrunderii din îmbinare.
- Grafice de comparație a rezistenței electrice a unei microîmbinări sudate de o lungime dată cu rezistența electrică a MB (fir din cupru) de aceeași lungime.
- Analiza de regresie statistică a dependențelor rezistenței electrice de contact în funcție de puterea pulsului, și energia pulsului.
- Analiza de regresie statistică a dependențelor lățimii zonei influențate termic (ZIT) în funcție de energia pulsului, puterea pulsului și durată pulsului.
- Analiza de regresie statistică a influențelor intensității curentului electric față de lățimea și înălțimea pătrunderii la o simulare de topire a polimerilor cu transparentă ridicată.

- Analiza de regresie statistică a influențelor intensității curentului electric, față de lățimea și înălțimea pătrunderii la o simulare de topire a polimerilor cu transparență scăzută.
- Analiza de regresie statistică a influențelor intensității curentului electric, asupra lățimii și pătrunderii la microîmbinări: polimer opac - polimer transparent- polimer opac.
- Analiza de regresie statistică a rezistențelor electrice pentru diverse temperaturi de preîncălzire a celor trei cupluri de materiale: Al-Al, Cu-Al și Cu-Cu la o microîmbinare termosonică cu jet de aer cald.
- Modelarea matematică a influenței parametrilor activării cu ultrasunete asupra temperaturii obținute în cadrul procesului de microîmbinare cu ultrasunete a firelor de cupru, aur și argint pe folie de cupru.
- Analiza de regresie statistică a influențelor cantitative ale amplitudinii vibrației, timpului de activare cu US, și presiunii utilizate asupra temperaturii maxime obținute la o microîmbinare hibridă Laser-Ultrasunete pentru cele 3 cupluri de materiale îmbinate Cu-Cu, Ag-Cu și Au-Cu.
- Modelarea matematică a creșterii și descreșterii temperaturii în timpul procesului de microîmbinare hibridă Laser- Ultrasunete.
- Simularea procesului de microîmbinare hibridă Laser-US a perechilor de materiale Cu/Cu, Ag/Cu și Au/Cu ce cuprinde încărcarea termică în momentul decuplării surselor termice, analiza fiind făcută în diverse puncte ale zonei de îmbinare.
- Simularea procesului de microîmbinare termosonică cu ajutorul programului ANSYS a foliilor din cupru îmbinate termosonic în puncte prin suprapunere .
- Analiza de regresie statistică a influențelor amplitudinii timpului de activare și a presiunii de apăsare față de temperatura maximă obținută la microîmbinarea hibridă Laser diodă - Ultrasunete a cuplurilor de materiale: Al-Al, Al-Cu și Cu- Cu la capul activ de îmbinare- concepție proprie.

10.2.2 Contribuții ale cercetării experimentale

- Identificarea principalelor influențe ale parametrilor tehnologici ai procesului de microîmbinare eutectică a îmbinărilor tip folie - folie din materiale omogene (Cu) și eterogene (Ag-Cu), folosind diferite tipuri de aliaje eutectice ecologice fără plumb, asupra caracteristicilor de calitate ale microîmbinărilor, în vederea unei mai bune controlări a acestora.
- Evidențierea principalelor influențe ale parametrilor tehnologici ai procesului de microîmbinare prin topire cu fascicul Laser a îmbinărilor tip folie-folie din materiale omogene (Al sau Cu) și a îmbinărilor tip fir-fir din materiale omogene(Cu) asupra caracteristicilor de calitate ale microîmbinărilor, în vederea unei mai bune controlări a acestora
- Identificarea principalelor influențe ale parametrilor tehnologici ai procesului de microîmbinare termosonică a îmbinărilor tip folie-folie din materiale omogene (Al sau Cu) și eterogene (Al-Cu), folosind ca sursă termică suplimentară un jet cu aer cald, respectiv un fascicul Laser tip Diodă, asupra caracteristicilor de calitate ale microîmbinărilor, în vederea unei mai bune controlări a acestora

- Evidențierea principalelor influențe ale parametrilor tehnologici ai procesului de microîmbinare cu ultrasunete și a procesului de microîmbinare termosonică folosind ca sursă termică suplimentară fasciculul Laser a îmbinărilor tip fir-folie omogene (Cu-Cu) și eterogene (Au-Cu, Ag-Cu) asupra caracteristicilor de calitate ale microîmbinărilor, în vederea unei mai bune controlări a acestora
- Identificarea principalelor influențe ale parametrilor tehnologici ai procesului de microîmbinare prin topire cu fascicul Laser a materialelor polimerice sub formă de folie în condițiile operării cu temperaturi sub 240°C.
- Conceperea, realizarea și verificarea în funcționare a unui dispozitiv de microîmbinare hibridă Laser-Ultrasunete, fasciculul Laser fiind utilizat pentru preîncălzirea componentelor.
- Conceperea, realizarea și verificarea în funcționare a unui dispozitiv pentru microîmbinarea cu Laser-diodă a foliilor din polimeri
- Conceperea, realizarea și verificarea unui cap activ modular de microîmbinare termosonică hibridă Ultrasunete-Laser.

Autorul a mai emis și o cerere de brevetare a capului activ modular de microîmbinare termosonică hibridă Laser-Ultrasunete către OSIM, cerere aflată în curs de analiză la instituția sus amintită.

Rezultatele cercetărilor ce fac obiectul tezei de doctorat au fost valorificate prin publicarea sau comunicarea a 11 lucrări științifice în țară sau străinătate. O bună parte din rezultatele cercetării doctorale au fost obținute în cadrul colaborării doctorandului la contracte de cercetare din Planul National de Cercetare Dezvoltare, Programul CEEEX , respectiv Programul Parteneriate.

10.3 Direcții de cercetare pentru viitor

Este de așteptat că în viitorul apropiat procesele de microîmbinare a materialelor metalice neferoase și a materialelor nemetalice prin procedeele de microîmbinare studiate în cadrul tezei de doctorat și anume lipire eutectică, microîmbinare prin topire cu fascicul Laser și microîmbinare termosonică să cunoască o dezvoltare apreciabilă datorita potențialului de aplicare în industria electrică și electronică. Ca direcții de cercetare pentru viitor se prefigurează:

- Cercetarea proceselor de realizare a îmbinării și microîmbinării unor materiale avansate (materiale compozite), materiale polimerice cu procedeele cercetate: microîmbinare eutectică, microîmbinare cu fascicul Laser și microîmbinare termosonică
- Cercetarea în vederea utilizării energiei solare ca sursă termică pentru procese de microîmbinare
- Cercetări în vederea fundamentării condițiilor de utilizare pentru îmbinarea materialelor nemetalice a unor noi procedee de microîmbinare ca microîmbinarea anodică (Anodic bonding) sau microîmbinarea cu sticlă sinterizată (aglutinată).

ANEXA 1
CALCULUL ECONOMIC AL PROBELOR TIP FOLIE ÎMBINATE PRIN SUPRAPUNERE

Probe folie cu suprafața activă de 1,00 x 5,00 mm îmbinate prin cele 3 procedee, cu sau fără MA (Eutectic - nu se poate decât cu MA):

	Laser fără MA	Laser cu MA	Eutectic	Termosonic fără MA	Termosonic cu MA
Durata pregătire MB [s]	13,0000	19,0000	19,0000	13,0000	19,0000
Șlefuire	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000
Curățare chimică	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
Fixare în dispozitiv	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000
Depunere material de adaos	0,0000	6,0000	6,0000	0,0000	6,0000
Durata proces microîmbinare [s]	0,1000	0,4000	3,0000	0,2000	0,3000
Durata totală [s]	13,1000	19,4000	22,0000	13,2000	19,3000
Tarif [lei/s]	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032
	0,0414	0,0612	0,0694	0,0417	0,0609
Cheltuieli de manoperă					
Consum energetic specific [W/s]	13,8889	1,6667	3,3333	1,2500	2,5000
Număr de pulsuri	10,0000				
Consum / puls [W/puls]	1,3889				
Timp de funcționare continuă [s]		2,0000	4,0000	1,5000	3,0000
Consum / unitate timp [W/s]		0,8333	0,8333	0,8333	0,8333
Tarif energie [lei/W]	0,0000016667	0,0000016667	0,0000016667	0,0000016667	0,0000016667

Cheltuieli de energie		0,0000231481	0,0000027778	0,0000055556	0,0000020833	0,0000041667
	Cantitate MA [g]	0,0000	0,0500	0,0500	0,0000	0,0500
	Cost SAC / g [lei/g]	3,5000	3,5000	3,5000	3,5000	3,5000
	Cost SA / g [lei/g]	3,2500	3,2500	3,2500	3,2500	3,2500
	Cost Bi-Sn / g [lei/g]	1,8500	1,8500	1,8500	1,8500	1,8500
Cheltuieli cu MA - SAC	Cost MA SAC [lei]	0,0000	0,1750	0,1750	0,0000	0,1750
Cheltuieli cu MA - SA	Cost MA SA [lei]	0,0000	0,1625	0,1625	0,0000	0,1625
Cheltuieli cu MA - Sn-Bi	Cost MA Sn-Bi [lei]	0,0000	0,0925	0,0925	0,0000	0,0925
Cost total	SAC	0,0414	0,2362	0,2445	0,0417	0,2359
	SA	0,0414	0,2237	0,2320	0,0417	0,2234
	Sn-Bi	0,0414	0,1537	0,1620	0,0417	0,1534
		Cel mai ieftin	Locul IV	Locul V	Locul II	Locul III

Bibliografie

- [1] Amstrong, A, P.M. Williams, McLaren T.S. , Lee Y.C Studies of thermosonic bonding for flip-chip assembly Original Research Article Materials Chemistry and Physics, Volume 42, Issue 1, October 2006, Pages 31-37.
- [2] Ardebilli H.C., Hillman, and M. A. E Natishan, 2008 "A comparison of the theory of moisture diffusion in plastic encapsulated microelectronics with moisture sensor chip and weight gain measurement " IEEE-Components and Packaging Technologies, 25:132-139
- [3] Boettinger, W.J., et al. Whisker and Hillock formation on Sn, Sn-Cu and Sn-Pb electrodeposits, Acta Materialia-I, 53 , 5033-5050-2009
- [4] Boettinger, W.J., et al. Whisker and Hillock formation on Sn, Sn-Cu and Sn-Pb electrodeposits, Acta Materialia-II, 53 , 5033-5050-2010
- [5] Chan, B. Leung, and H.D. Liu, "Effects of Soft Beam Energy on the Microstructure of Pb37Sn, Au20Sn, and Sn3.5Ag0.5Cu Solder Joints in Lensed-SM-Fiber to Laser-Diode-Affixing Application", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 46, pp. 75-82, 2008.
- [6] Chan, Yu Hin, Kim, Jang-Kyo, Liu, Deming, Liu, Peter C. K., Cheung, Yiu Ming, Ng, Ming Wai, "Effects of bonding frequency on Au wedge wire bondability," J Mater Sci: Mater Electron, No. 19, 2008, pp. 281 - 288
- [7] Cheah, L. K. , Tan, Y. M. , Wei J.and Wong C. K. "Gold to Gold Thermosonic Flip-Chip Bonding" Electronics Packaging Group, Gintic Institute of Manufacturing Technology, 71 Nanyang Drive, Singapore 638075 Tel: 65-7938540 Fax: 65-7922779
- [8] Chevalier P.Y.: A thermodynamic evaluation of the Ag-Sn system. Thermochimica Acta 136, 45 (1988)
- [9] Dale J. R. and Oldfield R. C. 1977, "Mechanical stresses likely to be encountered in the manufacture and use of plastically encapsulated devices," Microelectronics and Reliability, 16:255-258
- [10] Demian, G. Lasere, ediția a II-a, revizuită și adăugită, colecția Academica, Editura TOP FORM, București, (2007).
- [11] Dehelean, D., Oancă, O. Ultrasonic welding of advanced biocompatible and shape memory alloys, Proceedings of the 2006 IIW International Congress, Timișoara, România, 2006, Volume 2, pp. 255-262 (8 pages), 9 ref.
- [12] Demian, G., **Sebeș, G.** Demian, M., Savu, I.D.: „Eutectic Microbonding of Copper Lamellar Elements of MEMS”. The World Congress on Engineering 2010 vol.II WCE 2010, June 30-July 2, 2010 London, U.K.
- [13] Deshpande A.W. and Pryputniewicz R. J. 2008a, "Moisture diffusion characterization of a plastic encapsulated package," IMAPS-New England Chapter, Boxboro, MA.
- [14] Deshpande A. W. and Pryputniewicz R. J. 2008b, "Characterization of a plastic encapsulated package for MEMS using OEH," 15th UACEM Symposium on MEMS and Nanotechnology, Springfield, MA
- [15] Devine, J., and Walsh, J., Ultrasonic Welding of Aluminum Sheet - Sonobond Ultrasonics, Inc. 2010
- [16] Ding, Yong, Kim, Jang-Kyo, Tong, Pin, "Effects of Bonding Force on Contact Pressure and Frictional Energy in Wire Bonding," Microelectronics Reliability, Vol. 46, 2006, pp. 1101-1112
- [17] Ding, Yong, Kim, Jang-Kyo, " Analysis of Ultrasonic Wire Bonding": Part 1.

- Effect of Bonding Parameters on Temperature Rise,"*Microelectronics Reliability*, Vol. 48, 2008, pp. 149-157
- [18] Farrens, S. and Sood, S. (2008). "Wafer Level Packaging: Balancing Device Requirements and Materials Properties". IMAPS. International Microelectronics and Packaging Society url = <http://www.suss.com/service/technical-publications/wafer-level-packaging/wafer-level-packaging-balancing-device-requirements-and-materials-properties.html>
- [19] Farrens, S.(2008)Latest Metal Technologies for 3D Integration andMEMS Wafer Level Bonding. (Report).
- [20] Gerginov, V. et al. "Diode lasers for fast beam laser experiments", *Optics Communications* 187 (2001), 219-230
- [21] Gerlach G. And Dötzel W. (2008). Ronald Pething. Ed. Introduction to Microsystem Technology: A Guide for Students (Wiley Microsystem and Nanotechnology). Wiley Publishing. doi:978-0-470-05861-9
- [22] Grzelak G. R. 2000, "Testing," The electronics packaging handbook, CRC Press LLC,Morgan Hill, CA.
- [23] Guillou D. F. 2003, "Packaging MEMS," <http://www.sensorsmag.com/articles/1203/20/main.shtml>, visited
- [24] Hall, R. N., Fenner, G. E., Kingsley, J. D. , Soltys, T. J. and R. O. Carlson, „Coherent Light Emission From GaAs Junctions". *Physical Review Letters* 9 (2007): 366–369, General Electric Research Laboratory, Schenectady, N.Y
- [25] Han, L., Wang, F.L., Xu, W.H., "Bondability window and power input for wire bonding." *J. Microelectronics Reliability*. 46, 610-615., 2006.
- [26] Hang , C.J., Wang , C.Q., Mayer , M.Y., Tian , H., Zhou , Y., Wang H.H. : "Growth behavior of Cu/Al intermetallic compounds and cracks in copper ball bonds during isothermal aging".Available online at www.sciencedirect.com-13 August 2007
- [27] Harper C. A. 1969, Handbook of electronic packaging, McGraw-Hill,New York, NY
- [28] Hongjun Ji, Mingyu Li, Chunqing Wang, Han Sur Bang, Hee Seon Bang : "In situ measurement of bond resistance varying with process parameters during ultrasonic wedge bonding" *journal of materials processing technology* (2 0 0 9) 139–144 journal homepage: www.elsevier.com/locate/jmatprotec
- [29] Howard H. Manko *Solders and soldering: materials, design, production, and analysis for reliable bonding*. McGraw-Hill Professional. Pp. 396–. ISBN 9780071344173.<http://books.google.com/books?id=MvSMg5HC1YcC&pg=PA396>. Retrieved 17 April 2011.
- [30] Hsieh, C. T, Ting, J. M., Yang, C. and Chung, C. K. 2002,"The introduction of MEMS"
- [31] Hui Xu, Changqing Liu, VadimV.,Silberschmidt, and Zhong Chen."Growth of Intermetallic Compounds in Thermosonic Copper Wire Bonding on Copper Metallization" *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, Vol. 39, No. 1, 2010 DOI: 10.1007/s11664-009-0951-8
- [32] Jaeger, R.C., Introduction to Microelectronics Fabrication, Vol. V, Modular erie sonSolid State Devices, (Neudeck, G.W. and Pierret, R.F., Eds.), Addison-Wesley, Reading, MA, 1988.
- [33] Jokieli,M. and Holtz,R.(2006).Experiences with Laser beam welding of dissimilar materials, *The Industrial Laser User* 43,26-29

- [34] Joly, G. Assemblage des thermoplastiques par soudage, *Techniques de l'ingénieur, Traite Plastiques et Composites*, AM 3760, p.1-14 -2007
- [35] Jun-hui Li, Lei Han, Jue Zhong, Observations on HRTEM features of thermosonic flip chip bonding interface, *Materials Chemistry and Physics* 106 (2007) pg. 457-460
- [36] Jun-hui Li, Lei Han, Ji-an Duan, Jue Zhong, Microstructural characteristics of Au/Cu bonded interfaces, *Elsevier, rev. Materials Characterization* 58 (2007)
- [37] Kim, J. , Cheng, Y.-T. , Chiao, M. and Lin, L. (2007). "Packaging and Reliability Issues in Micro/Nano Systems". Springer Berlin Heidelberg. Pp. 1777-1806. doi:10.1007/978-3-540-29857-1.
- [38] Kim,J., Jeong, B., Chiao,M. and Lin,L." Ultrasonic Bonding for MEMS Sealing and Packaging"-IEEE Transactions on advanced packaging, vol.32,No.2, May (2009)
- [39] Kobayashi, K., and Mito, I., "Single frequency and tunable laser diodes," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 6, 1988, pp. 1623-1633.
- [40] Koch, T. L., and Koren, U., "Semiconductor lasers for coherent optical fiber communications,"*IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 8, 1990, pp. 274
- [41] Kotaki, Y., and Ishikawa, H., "Wavelength tunable DFB and DBR lasers for coherent optical fibre communications," *IEE Proceedings, Part J*, Vol. 138, 1991, pp. 171-177.
- [42] Kovacs G.T.A., *Micro machined Transducers Sourcebook*, McGraw-Hill, New York, NY,1998.
- [43] Lani, S. , Bosseboeuf, A. , Belier, B. , Clerc, C. , Gousset, C. and Aubert, J. (2006). "Gold metallizations for eutectic bonding of silicon wafers". *Microsystem Technologies* 12: pp. 1021-1025. doi:10.1007/s00542-006-0228-6.
- [44] Le, Minh-Nhat, Pan, Jianbiao, Pham, Cuong-Van, " The Effects of 70 KHz Ultrasonic Frequency on the Reliability of Fine Pitch Gold Wire Bonding," *IMAPS and SEMI Advanced Technology Workshop on Wire Bonding*, July 14th, 2008, San Francisco, CA, USA
- [45] Li, M.Y., Ji, H.J., Wang, Murali, S.,:"Formation and growth of intermetallics in thermosonic wire bonds: Significance of vacancy-solute binding energy." *J. Alloys compounds*. 426, 200-207, 2006.
- [46] Li Jun-hui, Wang Fu-liang, Han Lei, Duan Ji-an, Zhong Jue: "Atomic diffusion properties in wire bonding " *College of Mechanical-Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China* December 2005 -www.sciencedirect.com
- [47] Lion K.S., *Transducers: Problems and Prospects*, IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, Vol. IECI-16, No.1, July 1969, pp. 2-5.
- [48] Lin, Y.-C., Baum, M., Haubold, M., Fromel, J., Wiemer, M., Gessner, T. and Esashi, M. (2009). "Development and evaluation of Au-Si eutectic wafer bonding". *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2009. TRANSDUCERS 2009. International*. Pp. 244-247. doi:10.1109/SENSOR.2009.5285519
- [49] Long, Zhi-li, Han, Lei, Wu, Yun-xin, Zhong, Jue, "Study of Temperature Parameter in Au-Ag Wire Bonding," *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, Vol. 31, No. 3, July 2008
- [50] Marian,P.P, Puşcaş,N.N. *Laseri și procese multifotonice*, Editura Tehnică, Bucureşti, (1988)

- [51] Madhav Datta, Tetsuya Ōsaka, Joachim Walter Schultze (2005). *Microelectronic packaging*. CRC Press. p. 196. ISBN 041531190X.
- [52] Marcov, A. "Advanced Laser Microjoining for MEMS Applications" *Lasers and Electro-Optics*, 1998. *CLEO*
- [53] Mihai Demian, **Sebeș, G.**, Demian, G., Savu, D., - Eutectic Micro bonding of Copper Lamellar Elements of MEMS, Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol. II WCE 2010, Londra, iulie 2010
- [54] Michael B. Cohn, Karl F. Böhringer, J. Mark Noworolski, Angad Singh, Chris G. Keller, Ken Y. Goldberg, and Roger T. Howe: "Microassembly Technologies for MEMS" University of California at Berkeley, Depts. of ME, EECS, 2008
- [55] Munekata, O. Toyoda, Y. Ohnishi, T. Ueshima, M. „Leadfree solder alloy”, Brevet SUA nr. 7682468 B2/2010.
- [56] Murali, Sarangapani, Srikanth, Narasimalu, Vath, Charles J. II, "Effect of Wire Diameter on the Thermosonic Bond Reliability," *Microelectronics Reliability*, Vol. 46, 2008
- [57] Murali, Sarangapani, Srikanth, Narasimalu, Vath, Charles J. III, "Effect of Wire Diameter on the Thermosonic Bond Reliability," *Microelectronics Reliability*, Vol. 47, 2009
- [58] Mys, I., Schmidt, M., Esser, G., Geiger, M.: „Method for welding dissimilar metal joining partners”, in particular, aluminium-copper connection points. Patent WO 2005/082569 A1, 2005
- [59] Mys, I., Schmidt, M.: „Laser micro welding of dissimilar Cu-Al materials for electronic contacts”. In: *Laser-based Micropackaging*, Proceedings of SPIE, Vol. 6107, 2006
- [60] Oancă, O. *Lucrarea 1: „Microîmbinarea materialelor neferoase prin procedee termosonice”, Proiect Nucleu PN 09 – 160 102 din anul 2009, : „Studiu documentar privind tehnici de microîmbinare a materialelor neferoase prin procedee termosonice. Baza de informații actualizată. Echipamente și tehnologii”*
- [61] Oancă, O. *Lucrarea 2: „Microîmbinarea materialelor neferoase prin procedee termosonice”, Proiect Nucleu PN 09 – 160 102 din anul 2009, „Conceperea configurației constructiv funcționale a unor echipamente și sisteme flexibile de microîmbinare termosonică, modelare procese de microîmbinare termosonică”*
- [62] Otter, C., *Wirebonding in microelectronics TWI Knowledge Summary-2011*
- [63] Park, K.K., Lee, H., Kupnik, J. M., Oralkan, Ö. and B. T. Khuri-Yakub Edward L., *Fabricating capacitive micromachined ultrasonic transducers with direct wire-bonding and locos technology*, MEMS 2008, Tucson, AZ, USA, 2008
- [64] Pecht M.G., Nguyen L.T., and Hakim E.B., 1995, *Plastic encapsulated microelectronics*, Wiley, New York, NY.
- [65] Perkin-Elmer Applied Biosystems, <http://www.perkin-elmer.com>, <http://www.appliedbiosystems.com>
- [66] Petersen K.E., *Silicon as a Mechanical Material*, Proceedings of the IEEE, May 1982, Vol. 70, No. 5, pp.420-457
- [67] Ristic Lj., *Sensor Technology and Devices*, Artech House, London, 1994.
- [68] Sammoura, F., Kang, J. J., Heo, Y. M., Jung, T. S. and Lin, L. "Polymeric microneedle fabrication using a micro injection molding technique," *Microsyst. Technol. J.*, vol. 13, pp. 517-522, 2007.
- [69] Saemak, V.V., Knorovsky G.A. and MacCallum, D.O. "On the Possibility of Microwelding with Laser Beams" *J. Phys. D: Appl. Phys.* 36, 2170-2174 (2009).

- [70] Savu, I.D., Savu, S. and Bîrdeanu, V., "Microjoints for micro-electronical applications" *Welding in the World*, 2007, vol. 51, SPI, pag. 403-410, UK
- [71] Savu, I.D. and Bîrdeanu, V., "Fume emission in laser processing of the nanostructured composites", International Conference "Innovative Technologies for Joining Advanced Materials", Timișoara, 07- 08.06.2007
- [72] **Sebeș, G.** and Savu, I.D.: „Nd:YAG Laser heating influence on the welding process of CuAu matrix nanostructured composite material”-1st Central and Eastern European Conference on Thermal Analysis and Calorimetry-Craiova, Romania sept.2011
- [73] **Sebeș, G.** Savu, I.D. Savu, S.V., and Gherasim, N.: „Laser Device for Polymers Microjoining” University of Craiova, Conferința Internațională de sudură TIMA04 Timișoara-România 2009.
- [74] Schneider, A., Rank, H., Müller-Fiedler, R., Wittler, O. and Reichl, H. (2009). "Stabilitätsbewertung eutektisch gebondeter Sensorstrukturen auf Waferlevel". In Hermann, G.. Chemnitzer Fachtagung Mikromechanik & Mikroelektronik. pp. 51-56
- [75] **Sebeș, G.**, Nanciu, Borcan, A. I., și Ciocionoiu I „Analiza comparativă a calității microîmbinărilor realizate prin procedee de micro îmbinare eutectică și microîmbinare termosonică”2010. Conferința națională de sudură ASR-SUDURA 2010-Ploiești
- [76] **Sebeș, G.**, Savu, I.D., Savu, S.V. and Fulga, D.: „Comparative study of electrical resistance measurement, micro- joints produced by eutectic and termosonic process”International conference advances in engineering and management ADEM –Drobeta Turnu Severin -Romania
- [77] **Sebeș, G.**, Savu, I.D., și Savu, S.V. „Evolution of HV hardness in eutectic micro-joining section obtained with organic solder alloy –Conferința internațională de sudură TIMA 2010 Timișoara –România
- [78] **Sebeș, G.**, Savu I.D, Savu, S.V and Grecu, V. „Electrical conductors micro joining, by LASER beam fusion” “-The 2nd South- East European IIW International Congress Welding – HIGH TECH Technology in 21st century Sofia –Bulgaria, October 21st-24th 2010
- [79] **Sebeș, G.**, Savu I.D, Savu, S.V- „Microîmbinarea firelor din aur pe folii metalice, prin procedeul termosonic”, *Revista Sudura (B+ CNCISIS)*, nr.1, 2011.
- [80] Shah, A., Mayer, M., Zhou, Y.N., Hong, S.J., Moon, J.T.: "Low-Stress Thermosonic Copper Ball Bonding " Center for Adv. Mater. Joining, Univ. of Waterloo, Waterloo, ON, Canada . Date of Publication: 02 June 2009
- [81] Shim, J.H., Oh, C.S., Lee, B.J. and Lee D.N.: Thermodynamic assessment of the Cu-Sn system. *Z. Metallkde.* 87, 205 (1996).
- [82] Sîrbu, N.A., Iclănzan, T., Oancă, O.: "Conception, design and realization of the ultrasonic assembly for flow activation devices of the polymeric media" SISOM 2008 and Session of the Commission of Acoustics, Bucharest 29-30 May
- [83] Srikanth, N., Murali, S., Wong, Y.M., "Critical study of thermosonic copper ball bonding." *J. Thin Solid Films.* 462, 339-345, 2004.
- [84] Su, Y. C. and Lin, L.: "Localized bonding processes for assembly and packaging of polymeric MEMS," *IEEE Trans. Adv. Packag.*, vol. 27, no.4, pp.635-642, 2005
- [85] Su, Y. C. and Lin, L.: "Localized bonding processes for assembly and packaging of polymeric MEMS," *IEEE Trans. Adv. Packag.*, vol. 28, no. 8, pp. 432-543, 2006

- [86] Sun Li, Malshe A.P. , Cunningham, S. and Morris A. "Localized CO2 Laser bonding process for MEMS packaging" 1. Department of Mechanical Engineering, University of Arkansas, Fayetteville, AR 7270 1, USA; accepted 25 April 2006 Available online at www.sciencedirect.com
- [87] Tan, A.W.Y. ,Tay , F.E.H. and Zhang J. "Characterization of localized Laser assisted eutectic bonds" a Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, 10 Kent Ridge Crescent, Singapore 119260, Singapore 16 June 2005; accepted www.sciencedirect.com
- [88] Tsujino , J. Ihara, S., Harada,Y., Kasahara, K., Sakamaki, N. Characteristics of coated copper wire specimens using high frequency ultrasonic complex vibration welding equipments, Elsevier, rev. Ultrasonics nr. 42 pg. 121–124, 2004
- [89] Van de Ven J. D. et all, Laser Transmission welding of thermoplastics – Part I, Temperature and pressure modelling, Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol.129, 2007
- [90] Wang ,C., Watt ,H., De Wolf ,I., Cuntajar,R.: "Laser Assisted Polymer Bonding for MEMS Assembly and Packaging" Design for Micro & Nano Manufacture (NoE PATENT-DfMM) Network of Excellence funded by the European Commission (EC FP6: IST, Unit C2, Contract 507255) Heriot Watt University, October 2007
- [91] Wang,F., Han,L. Zhong,J. "Stress-induced atom diffusion at thermosonic flip chip bonding interface" School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha, HN Province 410083, PR China Sensors and Actuators A 149 (2009) 100–105 journal homepage: www.elsevier.com/locate/sna
- [92] White R.M., A Sensor Classification Scheme, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol UFFC-34, No.2, March 1987, pp. 124
- [93] Wu Yun-xin, Long Zhi-li, Han Lei, Zhong Jue:"Temperature effect in thermosonic wire bonding" – School of Electromechanical Engineering, Central South University, Changsha 4 10083, China accepted 12 January 2006 Available online at www.sciencedirect.com
- [94] Xu, H. , Liu, C., Silberschmidt,V.V. , Pramana, S.S. , Whiteb T.J. and Chenb Z.: "A re-examination of the mechanism of thermosonic Gold ball bonding on copper metallization pads" Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Loughborough University, Loughborough LE11 3TU, UK-2009
- [95] Yeau-Ren Jeng; Sang-Mao Chiu; Pay-Yau Huang; Shih-Hwa Shyu; "Investigation of Thermosonic Wire Bonding Resistance of Gold Wire Onto Copper Pad " Dept. of Mech. Eng., Nat. Chung Cheng Univ., Chiayi, Taiwan Issue Date: Jan. 2010
- [96] Yen, Y., Chen, S., "Phase equilibria of the Ag-Sn-Cu ternary system", J.Mater.Res, Vol. 19, No. 8, Aug. 2004, 2298-2305
- [97] Zhong, Z. W., Goh, K. S., "Investigation of Ultrasonic Vibrations of Wire Bonding Capillaries," Microelectronics Journal, Vol. 37, 2006, pp. 107-113
- [98] Analog Devices Inc., <http://www.analog.com>
- [99] Berkeley Sensor and Actuator Center, <http://bsac.eecs.berkeley.edu>
- [100] Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA),<http://www.darpa.mil/MTO>
- [101] IIW White Paper – WhiP DRAFT Version: 2nd January 2008, International Institute of Welding, Paris

- [102] Lucas Novasensor, <http://www.novasensor.com>
- [103] Memscap, <http://www.memscap.com>
- [104] Merlin Diagnostika GmbH, <http://www.merlin-diagnostika.com> (2008)
- [105] Motorola, Sensor Products Division, <http://www.motorola.com> (2009)
- [106] MSIT world library: Evaluation of the ternary Sn-Cu-Ag system, www.matport.com, (2010)
- [107] Sandia National Laboratories
SUMMIT*Technologies, <http://www.mems.sandia.gov>
- [108] Sisteme de microîmbinare pentru elemente de circuit și încapsulare ale microsenzorilor și actuatorilor; acronim : MICROWELD, Contract de cercetare nr. 71-135/2007, tip PN II – PC coordonator: ISIM, Timisoara; parteneriat: Universitatea din Craiova, coordonator: prof. Mangra M. ; durata finanțării : 2007-2010; (www.mindeon.com/microweld)
- [109] STEAG microParts GmbH, <http://microparts.de>
- [110] First MEMS Technology Showcase to be Held at MEMS Executive Congress 2011
- [111] MEMS: A Practical Guide to Design, Analysis, and Applications, Springer, William Andrew Publishing Norwich, NY, U.S.A. (2006),
- [112] <http://www.hybond.com/pages/diebond-about.php> HIBOND 330 State Place Escondido, CA 92029, Phone: 760-746-7105, Fax: 760-746-1408, 2012-techsupport@hybond.com
- [113] Buletinul AGIR nr.1/2011-Tehnologii de lipire și brazare în industria electronică



Curriculum vitae – Ing. Grigore SEBEȘ

Experiența profesională	
Perioada	01.oct.2008.-Prezent
Funcția sau postul ocupat	Preparator Doctorand Inginer univ.
Numele și adresa angajatorului	UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA,
Perioada	1990-1997
Funcția sau postul ocupat	Inginer, șef grupă inspecție C.T.C.
Numele și adresa angajatorului	SC MEVA SA Drobeta Turnu-Severin
Perioada	1987-1990
Funcția sau postul ocupat	Inginer, șef Laborator sudură
Numele și adresa angajatorului	SC MEVA SA, Drobeta Turnu Severin
Perioada	1983-1987
Funcția sau postul ocupat	Inginer, secția - Recipienți sub presiune
Numele și adresa angajatorului	SC MEVA SA, Drobeta Turnu Severin
Educație și formare	
Perioada	11.09.2008-Prezent
Calificarea / diploma obținută	Doctorand Inginer
Numele instituției de învățământ	Facultatea de Mecanică, Universitatea Politehnica Timișoara - studii de doctorat
Perioada	2005-2008
Calificarea / diploma obținută	Ing. diplomat, Utilaje și Instalații Portuare
Numele instituției de învățământ	UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA, România
Perioada	1980-1983
Calificarea / diploma obținută	Subinginer, - TEHNOLOGIA SUDĂRII
Numele instituției de învățământ	Institutul politehnic „TRAIAN VUIA” Timișoara –Institutul de subingineri Reșița
Perioada	1974-1978
Calificarea / diploma obținută	Diplomă - specialitatea: Mașini și utilaje
Numele instituției de învățământ	Liceul mecanic nr.1 Drobeta Turnu Severin,
Apartenența la o asociație profesională	2007- Membru în Asociația Sudorilor din România (A.S.R.)

Lista lucrărilor științifice realizate în domeniul tematic al tezei

Lucrări științifice publicate în Reviste indexate ISI

- [1] I.D. Savu, S. Savu and **G. Sebeș**: "Preheating and heat addition by laser beam in hybrid Laser-US welding", 1st Central and Eastern European Conference on Thermal Analysis and Calorimetry, (CEEC-TAC1), 7-10 September 2011-Craiova-Romania, ISBN 978- 606-11-1893-9 JOURNAL OF THERMAL ANALYSIS AND CALORIMETRY,
<http://www.editorialmanager.com/jtac/default.asp>

Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice(Proceedings) indexate ISI

- [1] G. Demian, D. Savu, M. Demian **G.A. Sebeș**: „Eutectic Micro bonding of Copper Lamellar Elements of MEMS”, Proceedings of the World Congress on Engineering Vol. II WCE, Londra, iulie 2010 pag 1047-1049, ISBN – 978-988-18210-7-2, ISSN: 2078- 0966 (Online)
<http://www.scopus.com/record/display.url>

Lucrări științifice publicate în reviste de specialitate (BDI)

- [1] **G. Sebeș**, D. Savu and S. Savu: „Microjoining by thermosonic process of the gold wires on the metallic foils”, National Conference of Welding - ASR „SUDURA 2011” Reșița 5-7 april. 2011, revista SUDURA (CNCSIS B+), nr.1, 2011_ <http://www.asr.ro>

Lucrări publicate în volumele unor manifestări științifice (Proceedings) din străinătate (țări UE sau comparabile)

- [1] **G. Sebeș**, D. Savu, S. Savu, and V. Grecu: „Electrical conductors micro-joining, by Laser beam fusion”. The 2nd South-East European IIW International Congress Welding –HIGH-TECH Technology in 21st century, Sofia –Bulgaria 21-24 Oct. 2010- Proceedings ISBN 978-954-9322-25-5, <http://www.erhold.bg/>
- [2] I.D. Savu, **G. Sebeș**, and S. Savu, "Nd: YAG Laser heating influence on the welding process of Cu/Al matrix nanostructured composite material"-1st Central and Eastern European Conference on Thermal Analysis and Calorimetry (CEEC-TAC1), 7-10 September 2011-Craiova-Romania, ISBN 978-606-11-1893-9 <http://www.editorialmanager.com/jtac/default.asp>

Lucrări publicate în volumele unor manifestări științifice

- [1] **G. Sebeș**, D. Savu, and S. Savu, - „Evolution of HV hardness in eutectic microjoining section obtained with organic solder alloy"- „International Conference Innovative Technologies for Joining Advanced Materials”, Timișoara - iunie 2010
- [2] **G. Sebeș**, D. Fulga, D. Savu, and S. Savu, „Comparative study of electrical resistance measurement, micro-joints produced by eutectic and thermosonic”, International Conference ADEM - 2010, Drobeta Tr. Severin, Mai 2010, ISBN 978-606-510-899-8
- [3] **G. Sebes**, I.D.Savu and S.Savu -„Evaluări termo-diferențiale pentru aprecierea comportării la microîmbinare cu microunde a feritei de bariu W"- ASR„SUDURA 2009” Îmbinare și microîmbinare.Drobeta Tr. Severin, Oct. 2009, ISSN 1843 – 4738.
- [4] A. Ionescu, **G. Sebeș** and S. Savu - „Evaluări analitice și experimentale ale ciclului termic la microîmbinarea în câmp unidirecțional de microunde"- ASR „SUDURA 2009” Îmbinare și microîmbinare. Drobeta Tr. Severin, Oct. 2009, ISSN 1843- 4738
- [5] I.D. Savu, S.V. Savu, **G. Sebeș** and N. Gherasim – “Laser device for polymer

microjoining”, The 3rd International Conference Innovative Technologies for Joining Advanced Materials, p. 118-121, ISSN 1844-4938

- [6] **G. Sebeș**, A. Nanciu, I. Borcan and I. Ciocionoiu: „Comparative analysis of quality micro-joints made by means of eutectic bonding end thermosonic bonding process”- International ASR Conference „WELDING 2010 - Publication (CNCSIS-B), ISSN: 1224-8495 www.bulletin.upg-ploiesti.ro

Activitate cercetare științifică

- [1] **Contract de cercetare nr. 71-135/2007**, tip PN II – PC beneficiar Ministerul Educației și Cercetării; coordonator: ISIM Timișoara; parteneriat: Universitatea din Craiova, Facultatea de Ingineria și Managementul Sistemelor Tehnologice din Drobeta Turnu Severin; coordonator parteneriat: prof. Mangra Mihail; titlu: „**Sisteme de microîmbinare pentru elemente de circuit și încapsulare ale microsenzorilor și actuatorilor**”; acronim: MICROWELD; (membru în colectivul de cercetare), durata finanțării: 2007-2010; (www.mindeon.com/microweld)
- [2] **Grant de cercetare (CEEX) nr. 266/ 2006**, beneficiar: Ministerul Educației și Cercetării; coordonator: ISIM Timișoara; partener: Universitatea din Craiova, Facultatea de Ingineria și Managementul Sistemelor Tehnologice din Drobeta Turnu Severin; coordonator parteneriat: prof.dr.ing. Mangra Mihail; titlu: „**Microstraturi plurifuncționalizate pentru acoperirea aliajelor de titan prin tehnologii avansate**”; acronim: MICROFUNCTIA (membru în colectivul de cercetare); durata finanțării: 2006-2008 (www.isim.ro)
- [3] **Grant de cercetare (CEEX) nr.265/ 2006**, beneficiar: Ministerul Educației și Cercetării; coordonator: - ISIM Timișoara; partener: Universitatea din Craiova, Facultatea de Ingineria și Managementul Sistemelor Tehnologice din Drobeta Turnu Severin; coordonator parteneriat: prof.dr.ing. Mangra Mihail; titlu: „**Centrul virtual pentru tehnologii integrate cu aplicații ale energiei electroultraacustice în ingineria materialelor avansate**”; acronim: ULTRATECH;(membru în colectivul de cercetare) durata finanțării: 2006-2008 (www.isim.ro)
- [4] **Grant de cercetare (CEEX) nr. C85/2006**, beneficiar: Ministerul Educației și Cercetării; coordonator: Universitatea din Craiova, Facultatea de Ingineria și Managementul Sistemelor Tehnologice din Drobeta Turnu Severin; director proiect: prof.dr.ing. Mangra Mihail; titlu: „**Dezvoltarea cunoașterii asupra elaborării și microprocesării prin metalurgia pulberilor a materialelor nanostructurate pentru componente MEMS**”; acronim: PRONANOMAT (membru în colectivul de cercetare); durata finanțării: 2006-2008 (www.pronanomat.eu și www.imst.ro)

Participări programe internaționale

- [1] **G. Sebeș - Turnarea sub înaltă presiune a aluminiului** - Corso di laurea in ingegneria dei materiali în cadrul programului LLP/ERASMUS, preparare proiect de licență, coordonator proiect prof.Mario Rosso, calificativ: foarte bine, 17 Feb.-31Mai 2008, Politehnica din Torino -Italia

Lucreare Brevet de invenție

- [1] D. Savu și **G. Sebeș** - Cap activ modular folosit la microîmbinarea hibridă Laser-Ultrasunete

