**Rezumat teza Groza**

Numeroase structuri din industria aerospatială, a vehiculelor terestre, navelor maritime si fluviale se execută din materiale disimilare.

Imbinarea materialelor disimilare prin tehnici care sa asigure o continuitate metalica are la bază fructificarea unei combinaţii favorabile de proprietăţi mecanice ale unui material cu o masă specifică redusă sau o bună stabilitate la coroziune a celui de al 2-lea material.

In general , problemele legate de sudabilitatea acestor materiale se bazează pe diferenţele existente între proprietăţile lor şi anume:

* Tipul si parametrul reţelei cristaline;
* Temperatura de topire;
* Masa specifică;
* Coeficientul de dilatatie liniară;
* Conductivitatea termică;
* Tipul diagramei de echilibru a celor 2 metale de bază.

Intrucât imbinarea materialelor disimilare nu poate fi realizata intotdeauna cu ajutorul tehnicilor obisnuite (sudare WIG, MIG etc), pentru rezolvarea problemelor de incompatibilitate intre aliajele de titan si otelurile inoxidabile ne-am propus ca prim obiectiv al tezei de doctorat studiul procesului de sudare cu fascicul laser folosind ca strat intermediar o folie din cupru.

Al 2-lea obiectiv a vizat oportunitatea sudarii prin frecare a acestor materiale, iar aprecierea calitatii imbinarilor sudate s-a facut prin investigatii macro- si micrografice, incercari mecanice, analize rontgenostructurale si la microsonda electronica.

Sudarea cu fascicul laser(fig.2.1) constituie un proces de topire fara utilizarea unui material de adaos.

Ca urmare a densitatii foarte mari de energie(105-106 W/cm2), zona inflentata termic este ingusta.

In functie de aplicatia dorita se poate utiliza fie varianta laser care opereaza in mod continuu(pentru componente cu grosimi mari), fie varianta laser in mod pulsat(pentru component subtiri).

Materialele folosite pentru imbinare sunt aliajul de titan cu 6% Aluminiu si 4% Vanadiu avand o structura de echilibru bifazica alfa+beta(fig.2.11) si otelul inoxidabil cu 18% Crom si 10% Nichel avand o microstructura la temperatura camerei constituita din austenita , o mica proportie de ferita delta si carburi de tipul (CrFe)23C6(fig.2.13).

Sudarea prin topire a acestui cuplu de materiale nu poate fi realizata direct deoarece in urma solidificarii baii topite se formeaza faze intermetalice fragile intre fier si titan care provoaca fenomene de fisurare. De aceea s-a adoptat tehnica sudarii laser Nd-YAG cu mod de operare continua, iar pentru diminuarea proportiei de faze intermetalice nedorite s-a intercalat o folie din cupru cu grosimea de 600 µm intre cele doua materiale de baza.

Utilizand instalatia laser din figura(fig.2.15) au fost executate imbinari sudate cap la cap variind atat puterea fasciculului cat si viteza de sudare(tab.2.1)

Diametrul petei focale a fost de 200µm, iar fasciculul a fost centrat la 40-60µm in raport cu planul imbinarii(tab.2.1). Gazul de protectie utilizat a fost argonul.

Urmare a diferentei mari de reflectivitate a materialelor, sudurile eterogene obtinute au un aspect asimetric(fig.2.16), cea mai mare parte a zonei topite aflandu-se in vecinatatea otelului inoxidabil, iar aliajul de titan este foarte putin topit.

Pentru determinarea rezistentei la rupere a imbinarilor sudate cap la cap s-a utilizat o masina universala de incercare(fig.2.17), iar locul de prelevare a probelor este aratat in figura(fig.2.18) si respecta normele europene.

Rezultatele obtinute atesta faptul ca forta de rupere se modifica semnificativ cu energia liniara folosita la sudare(tab.2.2)

Morfologia suprafetelor de rupere(fig.2.20) evidenteaza caracterul predominant ductil al zonelor examinate.

Imaginile microstructurale redate in aceste figuri(fig.2.22-2.27) pun in evidenta caracterul complex al acesteia si anume:

* O zona de culoare inchisa pe interfata aliaj de titan-sudura(fig.2.22);
* Incluziunii de otel inoxidabil cu forma poligonala in zona foliei de cupru (fig.2.24 si 2.25);
* Fasia de sudura din apropierea otelului inoxidabil cu particule disperse de faze secundare(fig.2.27).

Curba gradient de duritate pe sectiunea transversala a imbinarii sudate, arata ca(fig.2.28) valorile acestora sunt de circa 320HV in aliajul de titan, apare un maxim de circa 410HV in sudura, iar in otelul inoxidabil duritatea este cea specifica austenitei.

Difractograma redata in figura(fig.2.29) demonstreaza ca la parametrii tehnologici optimi s-a reusit evitarea formarii de faze care sa fragilizeze puternic cusatura sudata.

Din figura(fig.2.31) se remarca faptul ca in vecinatatea cusaturii sudate, in compozitia chimica a aliajului de titan sunt prezente titanul in proportie de 90,6%-90,8%, Aluminiu 6,5%-7,5%, Vanadiu 2,9% si alte impuritati notate cu C in proportie de 1,7%. In schimb, portiunea din ZIT a otelului inoxidabil contine 17,6% Cr, 7,7% Ni, 72,4% Fe si 2,4% alte elemente notate cu C.

Variatia liniara a principalelor elemente de aliere prezente in imbinarea sudata evidentiaza faptul ca alaturi de austenita, in sudură se pot forma mici cantitati de faze secundare, iar pe interfata dintre aliajul de titan si sudura apare o scadere continua si rapida a concentratiei in titan, astfel ca probabilitatea de formare a fazelor fragilizante in proportie ridicata ramane redusa(fig.2.32).

Aceleasi tipuri de incercari au fost conduse si pe imbinari sudate laser Nd-YAG pulsat.

Prin varierea parametrilor de regim(tab.3.1) s-a urmarit stapanirea compozitiei chimice a sudurii astfel incat sa se obtina proprietati mecanice corespunzatoare.

Figurile(fig.3.2-3.16) redau imaginea macrografica a imbinarilor sudate la diverse valori ale parametrilor de regim, iar figurile(fig.3.24-3.32) exemplifica microstructura zonelor imbinarilor sudate.

Investigatiile la microsonda electronica(fig.3.34) alaturi de analizele de difractie cu raze X(fig.3.35) au permis explicarea mecanismului transformarilor intervenite la diversele valori ale parametrilor de regim, precum si natura fazelor formate in sudura.

Pentru imbinarea cap la cap a doua piese din care cel putin una prezinta o suprafata de contact simetrica rotational a fost aleasa varianta sudarii prin frecare conventionala, variind presiunea de frecare, timpul de frecare si presiunea de refulare(fig.4.14).Ca strat intermediar s-a folosit o folie de cupru cu grosimea de 200 μm.

Imaginea macrografica redata in figura(fig.4.15) pune in evidenta o deformare mai pronuntata a aliajului de titan, deoarece in cursul incalzirii prin frecare s-a favorizat transformarea polimorfa a titan Alfa in titan Beta insotita de o scadere a rezistentei mecanice.

La valori mari ale presiunii de refulare o cantitate mai mare de material plastifiat este transferat catre bavura, fapt care conduce la obtinerea unei ZIT mai ingusta cu granulatie mai fina si o microstructura de forjare(fig.4.16).

Interfata sudurii este aproape dreapta(fig.4.17a) cu exceptia regiunii periferice in care se observa o amestecare mecanica considerabila(fig 4.17b).

La valori mai mici ale timpului de frecare si presiunii axiale,caldura dezvoltata la sudare este insuficienta si datorita unei plastifieri insuficiente a materialelor o parte din folia de cupru este exfoliată de pe suprafata componentelor(fig.4.18).

Curba gradient de duritate(fig.4.20) arata ca in ZIT apare o crestere a acesteia ca urmare a efectului de tratament termomecanic.

Incercarile de tractiune statica au aratat ca ruperea se produce fie in sudura, fie in imediata vecinatate a acesteia, in componenta din otel austenitic(fig.4.21).

Examinarile la microsonda electronica(fig.4.22) arata ca pe interfata imbinarii se formeaza practic un nou aliaj metalic,iar grosimea zonei de difuzie este limitata la circa 12 μm(fig.4.22 si fig 4.23).

Imaginiile topografice ale planului imbinarii si bavurii acesteia insotite de analiza chimica a unor microdomenii de material in cateva puncte semnificative(fig.4.24-4.27) demonstreaza ca imbinarea realizata are o alura cristalina si se bazeaza pe fenomene de difuzie.

Concentratia de cupru este mica in planul median al imbinarii sudate si ridicata in zona bavurii.Acest lucru demonstreaza ca in cursul procesului de imbinare, folia din cupru este expulzata in cea mai mare parte in bavura impreuna cu materialele celor doua componente.

***Principalele concluzii si contributii originale ale lucrarii pot fi sintetizate astfel:***

1. Stabilirea prin experiment a parametrilor optimi ai procesului de sudare cu fascicul laser, care să asigure formarea unor îmbinări fără defecte de continuitate de tipul fisurilor, retasurilor de contracţie şi porozităţilor.

Astfel, la sudarea laser Nd-YAG continuu parametrii energetici vor fi :

 • puterea P, 4000 W;

 • viteza de sudare, 3m/min.;

 • poziţia fasciculului, 40 μm;

 • energia liniară, 80 000 J/m,

iar la sudare în curent pulsat, aceştia au valorile:

 • puterea P, 1400 - 1500 W;

 • durata impulsului, 14 ms;

 • frecvenţa, 12 Hz;

 • viteza de sudare, 0,32 m/min.;

 • decalaj plan Cu – oţel inox. 140 – 150 μm.

2.Atenuarea incompatibilităţii metalurgice la sudarea celor două materiale, Ti6Al4V – X5CrNi18-10, prin intercalarea unei folii din Cu care favorizează separarea spaţială a interfeţelor de Ti şi de Fe, iar fazele intermetalice formate cu acest element sunt mai puţin fragile decât cele specifice cuplului Fe – Ti.

3.Definirea prin experiment a poziţiei optime a fasciculului laser(centrată în raport cu interfaţa dintre oţelul inoxidabil şi cupru) care permite atât o minimizare a topirii aliajului de titan, Ti6Al4V, cât şi menţinerea unei bune aderenţe la interfaţa dintre aliajul de titan şi cupru.

În plus,coeficientul scăzut de absorbţie a Cu de către lungimea de undă a laserului conduce la formarea de suduri îmbogăţite în oţel inoxidabil.

4. Elucidarea unor aspecte fenomenologice care apar la sudare şi care privesc în esenţă transformările structurale declanşate în îmbinarea sudată eterogenă, interacţiunea dintre materialul componentelor şi folia din Cu utilizată ca strat intermediar, lucrarea aducând contribuţii referitoare la:

* modificarea compoziţiei chimice a băii topite;
* natura şi dimensiunile zonei de tranziţie dintre aliajul solid de titan şi baia topită;
* efectul parametrilor de sudare asupra morfologiei zonelor topite.

5. Rezultatele examinărilor macrografice reliefează că îmbinările realizate prin ambele variante de sudare au o geometrie controlată în principal de transferul căldurii prin conducţie, ca urmare a timpului scurt de interacţiune între laser şi material.

6. Rezultatele analizelor chimice cantitative în microvolume de material folosind microsonda electronică, au demonstrat că interfaţa Ti6Al4V – Cu constituie o problemă critică a îmbinării sudate cu fascicul laser. Lăţimea, morfologia şi compoziţia sa chimică determină rezistenţa la rupere, iar controlul proprietăţilor se face prin:

 ● diminuarea amestecului între cele trei materiale care va limita prezenţa Fe în interfaţa Ti6Al4V – Cu şi implicit fragilizarea îmbinării sudate;

 ● difuzia Ti în Cu pe o distanţă de 60 – 80 μm cu formarea fazelor TixCuy;

 ● o grosime suficientă a interfeţei care să asigure o bună legătură cu aliajul solid de Ti.

7. La ambele variante de sudare laser, microstructura zonei sudate este eterogenă, fiind alcătuită în apropierea oţelului inoxidabil, în principal dintr-o matrice de Cu în care sunt înglobate numeroase globule de austenită, iar în apropierea aliajului de Ti din numeroase faze intermetalice încorporate în matricea din Cu.

8. Cercetările de difracţie cu raze X au demonstrat că introducerea Cu ca strat intermediar între aliajul de Ti şi oţelul inoxidabil nu izolează complet cele două materiale: transportul difuziv şi convectiv în zona topită antrenează formarea locală a fazelor FexTiy şi FeyTiz. Totuşi, formarea unei faze mai fragile Fe2Ti este minimizată, fapt care face posibilă realizarea îmbinării. Sudurile obţinute la parametrii optimi de proces au valori ale rezistenţei la rupere prin tracţiune statică de 318....354 N/mm2.

9. Oportunitatea îmbinării celor două categorii de aliaje folosind procedeul de sudare prin frecare cu material de adaos, aceasta permiţând evitarea formării de faze intermetalice fragile şi a unei structuri martensitice care să provoace fenomene de fisurare în zona sudurii. Prin experiment se demonstrează că la valori optime ale parametrilor de proces (presiuni axiale de 20 – 25 N/mm2 , viteză de rotaţie de 1500 rot./min., timpi de frecare de 24 – 28 s), se obţin valori ale rezistenţei la rupere de 340 – 380 N/mm2.

10. Investigarea la microsonda electronică a compoziţiei chimice locale a unei porţiuni din zona sudată prin frecare, cuprinsă între folia din Cu şi aliajul de Ti, confirmă rolul pe care îl are Cu în limitarea fenomenelor de difuzie a Fe, Cr şi Ni în aliajul de Ti şi totodată a difuziei Ti în oţelul inoxidabil austenitic.

11. Modelarea matematicăa procesului de sudare cu fascicul laser folosind metoda experimentului factorial. Selecţia şi analiza parametrilor de bază cu ajutorul programului Minitab 16 a condus la stabilirea condiţiilor de sudare care să conducă la valori maxime ale forţei de rupere pentru îmbinările realizate.

 În încheiere, se subliniază faptul că abordarea şi rezolvarea în limitele propuse a temei de cercetare ce face obiectul tezei de doctorat, prin urmărirea sistematică, punerea în evidenţă şi fundamentarea ştiinţifică a procesului de sudare cu fascicul laser sau prin frecare cu strat intermediar din cupru, reprezintă o contribuţie originală.

Îmbinarea cercetării laturii aplicative a acestor investigaţii din punctul de vedere al optimizării procesului de sudare cu latura fenomenologică, a determinării şi explicării ştiinţifice a transformărilor structurale declanşate în îmbinările sudate, face ca lucrarea să se înscrie în tendinţele şi metodologia modernă utilizată în cercetarea ştiinţifică.

***Ca directii viitoare de cercetare se exemplifica:***

 - oportunitatea sudării prin difuzie a celor două materiale utilizând o folie de Ni ca strat intermediar, pentru îmbinări care lucrează la temperaturi înalte;

 - sudarea prin explozie a aliajului de Ti cu oţelul inoxidabil austenitic, fără strat intermediar, care să prevină formarea de compuşi intermetalici şi să asigure creşterea rezistenţei mecanice;

 - îmbinarea prin brazare cu laser, care va minimiza amestecul materialelor, procesul având la bază difuzia interfeţelor dintre materialul de adaos topit şi cele două materiale de bază.

O parte din rezultatele obtinute au fost valorificate prin lucrari grupate in:

* reviste indexate ISI – 2 articole;
* manifestari stintifice proceedings ISI – 3 articole;
* reviste de specialitate (BDI) – 2 articole.