

# **CONTRIBUȚII PRIVIND SUDAREA OȚELURILOR ACOPERITE**

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

**...Ing. Aurelian Vasile Magda...**

Conducător științific: prof.univ.dr.ing. Livius Miloș  
Referenți științifici: prof.univ.dr.ing. Radu Iovănaș  
prof.univ.dr.ing. Viorel-Aurel Șerban  
prof.univ.dr.ing. Ioan Vida-Simiti

Ziua susținerii tezei: 11.12.2009

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- |                        |   |
|------------------------|---|
| 1. Automatică          | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie              | 8. Inginerie Industrială                    |
| 3. Energetică          | 9. Inginerie Mecanică                       |
| 4. Ingineria Chimică   | 10. Știința Calculatoarelor                 |
| 5. Inginerie Civilă    | 11. Știința și Ingineria Materialelor       |
| 6. Inginerie Electrică |   |

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, 2006

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 Știința materialelor și a sudării a Universității „Politehnica” din Timișoara, concretizată printr-un număr mare de tehnologii de sudare/îmbinare a oțelurilor acoperite, prin lucrări de cercetare publicate în reviste de specialitate, prin comunicări științifice susținute la diferite conferințe și simpozioane, naționale sau internaționale.

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat prof.dr.ing. Livius Miloș pentru propunerile, sugestiile și observațiile făcute privind sistematizarea datelor, informațiilor și rezultatelor în elaborarea tezei.

Autorul aduce mulțumiri cadrelor didactice din Facultatea de Mecanică, din cadrul Catedrei Știința Materialelor și a Sudării care m-au sprijinit în realizarea acestei teze de doctorat.

Timișoara, decembrie 2009

ing. Aurelian Vasile MAGDA

Magda, Aurelian Vasile

### **Contribuții privind sudarea oțelurilor acoperite**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 8, Nr. 22, Editura Politehnica, 2009, 171 pagini, 120 figuri, 43 tabele.

ISSN:1842-8967

ISBN : 978-606-554-019-4

Cuvinte cheie: Oțeluri acoperite, tehnologii de îmbinare oțeluri galvanizate, îmbinarea prin sudobrazare, analize metalografice îmbinări sudobrazate, protecția anticorozivă a oțelului  
Rezumat,

Tendențele actuale din domeniul construcțiilor metalice, în special cea a construcțiilor de automobile, de a găsi noi materiale prin care să se prelungească durata de viață a produselor, au contribuit la dezvoltarea echipamentelor și tehnologiilor de îmbinare cu ajutorul cărora se poate realiza îmbinarea acestor materiale.

O posibilitate de creștere a duratei de viață și a calității produselor metalice este protecția oțelurilor prin acoperirea cu materiale anticorozive. Această modalitate conduce la creșterea duratei de viață a produselor metalice de cca. 2 ori.

O problemă importantă în realizarea structurilor din astfel de materiale o reprezintă optimizarea proceselor/procedeele de îmbinare a oțelurilor acoperite.

Cercetările efectuate au fost îndreptate în principal spre posibilitățile de îmbinare ale oțelurilor galvanizate. Abordarea problematicii s-a făcut în contextul în care oțelurile acoperite, galvanizate și îmbinările acestora sunt preocupări de ultimă oră din literatura de specialitate.

Particularitățile care apar la îmbinarea oțelurilor acoperite prin galvanizare cu zinc a constituit un alt reper al cercetărilor. Procedeele de sudare a oțelurilor acoperite prin galvanizare au fost tratate în lucrare cu recomandări și tehnologii de sudare referitoare la posibilitatea obținerii unor îmbinări de calitate.

Din cercetările efectuate soluția optimă de îmbinare a oțelurilor galvanizate a rezultat a fi sudobrazarea. Se preferă această variantă de îmbinare deoarece aportul de căldură în zona îmbinării este mic. Acest aport termic scăzut conduce la faptul că straturile superficiale în speță cel obținut prin zincare sunt puțin expuse deteriorării, deformarea pieselor este de asemenea mică, modificările structurale din îmbinare sunt reduse.

## CUPRINS

Lista de tabele.....	8
Lista de figuri.....	9
1. INTRODUCERE.....	12
2. OBȚINERE, TIPURI, DOMENII DE APLICABILITATE ALE OȚELURILOR ACOPERITE.....	15
2.1 Metode de obținere a oțelurilor acoperite.....	15
2.1.1 Acoperirea prin imersare în metal topit.....	15
2.1.2 Acoperirea prin pulverizare termică.....	16
2.1.3 Acoperirea prin sudare prin topire.....	17
2.1.4 Acoperirea din stare solidă.....	18
2.1.5 Strat-uri de difuziune termică.....	19
2.1.6 Acoperirea electro-litică.....	19
2.1.6.1 Condiții la acoperirea electro-litică .....	20
2.1.6.2 Proprietățile straturilor depuse prin galvanizare.....	21
2.1.6.3 Instalații și dispozitive pentru galvanizare.....	22
2.2 Tipuri de oțeluri acoperite.....	23
2.2.1 Oțeluri acoperite prin zincare termică.....	23
2.2.2 Oțeluri acoperite prin imersare în aluminiu, staniu, plumb și aliaje.....	28
2.2.3 Oțeluri acoperite prin cadmiere electro-litică.....	29
2.2.4 Oțeluri acoperite prin cuprare electrochimică.....	30
2.2.5 Oțeluri acoperite prin nichelare electrochimică.....	31
2.2.6 Oțeluri acoperite prin cromare electrochimică.....	32
2.2.7 Oțeluri acoperite prin zincare electro-litică.....	33
2.3 Domenii de aplicabilitate.....	35
3. SUDAREA/ÎMBINAREA OȚELURILOR ACOPERITE.....	39
3.1 Sudarea oțelurilor acoperite.....	39
3.1.1 Particularități la sudarea prin topire a oțelurilor acoperite.....	39
3.1.2 Procedee de sudare a oțelurilor acoperite.....	41
3.1.2.1 Sudarea cu flacără oxigaz a oțelurilor acoperite.....	41
3.1.2.2 Sudarea manuală cu electrozi înveliți a oțelurilor acoperite.....	42
3.1.2.3 Sudarea WIG a oțelurilor acoperite .....	43
3.1.2.4 Sudarea MIG/MAG a oțelurilor acoperite.....	44
3.1.2.5 Sudarea cu fascicul laser a oțelurilor acoperite.....	46
3.2. Sudobrazarea oțelurilor acoperite.....	49
3.2.1 Metalurgia sudobrazării oțelurilor galvanizate.....	49
3.2.2 Procedee de îmbinare prin sudobrazare a oțelurilor acoperite.....	51
3.2.2.1 Particularități la îmbinarea prin sudobrazare a oțelurilor acoperite.....	51
3.2.2.2 Îmbinarea oțelurilor acoperite prin sudobrazare MIG.....	53
3.2.2.3 Îmbinarea oțelurilor acoperite prin sudobrazare cu aport termic scăzut, MIG-CMT.....	57
3.2.2.4 Îmbinarea oțelurilor acoperite prin sudobrazare WIG – varianta TOPTIG.....	61
3.2.2.5 Îmbinarea oțelurilor acoperite prin sudobrazare hibridă laser-MIG.....	70
3.3. Îmbinarea disimilară aluminiu-oțel galvanizat.....	74
4.CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND SUDAREA / ÎMBINAREA OȚELURILOR ACOPERITE.....	77

## 6 Cuprins

---

4.1 Îmbinarea prin sudobrazare MIG în curent pulsant a oțelurilor galvanizate.....	77
4.1.1 Materiale de bază utilizate .....	77
4.1.2 Materiale de adaos utilizate .....	77
4.1.3 Echipamentul utilizat .....	79
4.1.4 Probe experimentale.....	79
4.1.4.1 Probe experimentale realizate cu sârma CuAl8.....	79
4.1.4.2 Probe experimentale realizate cu sârma CuSi3.....	81
4.1.5 Încercarea îmbinărilor realizate.....	83
4.1.5.1 Încercarea îmbinărilor realizate cu sârma CuAl8.....	83
4.1.5.2 Încercarea îmbinărilor realizate cu sârma CuSi3.....	92
4.2 Îmbinarea prin sudobrazare cu aport termic scăzut, MIG-CMT.....	99
4.2.1 Materiale de bază utilizate .....	99
4.2.2 Materiale de adaos utilizate .....	99
4.2.3 Echipamentul utilizat .....	99
4.2.4 Probe experimentale.....	99
4.2.4.1 Sudobrazarea MIG-CMT în variantă mecanizată.....	99
4.2.4.2 Sudobrazarea MIG-CMT în variantă manuală.....	100
4.2.5 Încercarea îmbinărilor realizate.....	101
4.2.5.1 Încercarea îmbinărilor realizate cu procedeul MIG-CMT în variantă mecanizată.....	101
4.2.5.2 Încercarea îmbinărilor realizate cu procedeul MIG-CMT în variantă manuală.....	106
4.2.6 Încercări de rezistență la coroziune.....	113
4.2.6.1 Analiza termogravimetrică a oțelurilor galvanizate.....	113
4.2.6.2 Încercarea de rezistență la coroziune în ceață salină a oțelurilor galvanizate.....	118
4.3 Îmbinarea disimilară oțel galvanizat - aluminiu.....	121
4.3.1 Materiale de bază utilizate .....	121
4.3.2 Materiale de adaos utilizate .....	121
4.3.3 Echipamentul utilizat .....	122
4.3.4 Probe experimentale.....	122
4.3.5 Încercarea îmbinărilor realizate.....	123
4.3.5.1 Analiza macro și microscopică a probelor îmbinate.....	123
4.3.5.2 Încercări mecanice pe probele îmbinate.....	129
5 MODELAREA DISTRIBUȚIEI TENSIUNILOR LA ÎMBINAREA PRIN SUDOBRAZARE A OȚELURILOR ACOPERITE.....	135
5.1 Modelarea cu elemente finite a îmbinărilor sudobrazate din oțeluri galvanizate.....	135
5.2 Modelarea cu elemente finite a îmbinărilor disimilare dintre aluminiu și oțel galvanizat.....	141

6. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE.....	147
Anexe .....	152
A1 .....	152
A2 .....	153
A3.....	154
A4.....	158
BIBLIOGRAFIE.....	162

## Lista de tabele

- Tabelul 2.1 Indicele de adâncime pentru coroziune în atmosferă a straturilor depuse prin imersare în metal topit
- Tabelul 2.2 Procedee de acoperire prin pulverizare termică
- Tabelul 2.3 Indicatorii tehnologici ai procedeelor de placare prin sudare
- Tabelul 2.4 Exemple ale funcțiunilor straturilor galvanice
- Tabelul 2.5. Comportarea la coroziune atmosferică și în apă a Al și Zn
- Tabelul 2.6. Principalii parametri de regim la cadmierea electrolitică
- Tabelul 2.7. Principalii parametri de regim la cuprarea electrolitică
- Tabelul 2.8. Principalii parametri de regim la nichelarea electrolitică
- Tabelul 2.9. Principalii parametri de regim la cromarea electrolitică
- Tabelul 2.10 Parametri de zincare
- Tabelul 3.1. Proprietăți ale zincului și oțelului
- Tabelul 3.2 Recomandări tehnologice la sudarea cu flacără oxiacetilenică a oțelurilor galvanizate
- Tabelul 3.3 Recomandări tehnologice la sudarea manuală cu electrozi înveliți a oțelurilor acoperite pentru table de 3mm grosime
- Tabelul 3.4 Alegerea curentului de sudare la îmbinările în colț
- Tabelul 3.5 Parametrii utilizați sudarea WIG a tablelor galvanizate
- Tabelul 3.6 Parametri de sudare a tablelor galvanizate pentru procedeul MIG/MAG
- Tabelul 3.7 Parametri de sudare MIG/MAG în curent pulsant pentru table acoperite și pentru table neacoperite
- Tabelul 3.8 Parametri la sudarea cu fascicul laser a diverselor tipuri de acoperiri
- Tabelul 3.9 Efectul gazului de protecție la sudobrazarea MIG
- Tabelul 3.10 Principalele mărci de sârme utilizate la sudobrazarea MIG
- Tabelul 3.11 Parametri de sudobrazare funcție de rostul îmbinării
- Tabelul 3.12 Aplicații ale sudobrazării TOPTIG
- Tabelul 4.1 Compoziția chimică a sârmei CuAl8
- Tabelul 4.2 Proprietățile fizice ale sârmei CuAl8
- Tabelul 4.3 Compoziția chimică a sârmei CuSi3
- Tabelul 4.4 Proprietățile fizice ale sârmei CuSi3
- Tabelul 4.5. Date de intrare pentru stabilirea parametrilor de sudobrazare
- Tabelul 4.6 Parametrii de sudobrazare MIG utilizând sârma de adaos CuAl8
- Tabelul 4.7 Date de intrare pentru echipamentul MIG/MAG Pheonix 300
- Tabelul 4.8. Parametrii de sudobrazare după recomandările EWM
- Tabelul 4.9. Condiții de realizare a îmbinării tablelor zincate prin sudobrazare
- Tabelul 4.10 Parametrii de sudobrazare mecanizată MIG utilizând sârma CuSi3
- Tabelul 4.11 Parametrii de sudobrazare manuală MIG utilizând sârma CuSi3
- Tabelul 4.12 Grosimea stratului de zinc
- Tabelul 4.13 Grosimea stratului de zinc și a stratului de oxid
- Tabelul 4.14 Valorile durității HV5
- Tabelul 4.15 Parametri la sudobrazarea MIG-CMT în variantă mecanizată
- Tabelul 4.16. Parametri la sudobrazarea MIG-CMT în variantă manuală
- Tabelul 4.17 Rezultatele încercării la tracțiune
- Tabelul 4.18 Încercarea mecanică la tracțiune la îmbinările oțel galvanizat – oțel galvanizat
- Tabelul 4.19 Parametrii regimului de încercare la coroziune în ceață salină



Tabelul 4.20 Parametrii de îmbinare oțel galvanizat-aliaj aluminiu prin procedeul MIG-CMT

Tabelul 4.21 Rezultatele încercări mecanice ale îmbinărilor aluminiu cu oțel galvanizat

## Lista de figuri

- Fig. 2.1 Principiul placării prin explozie
- Fig. 2.2. Instalație pentru galvanizare
- Fig. 2.3. Structura straturilor la imersarea zincului
- Fig. 2.4 Difrakția cu raze X a oțelurilor zincate
- Fig. 2.5 Fazele tehnologice de imersare a zincului în mod discontinuu
- Fig.2.6 Imersarea zincului în mod continuu
- Fig. 2.7. Etapele galvanizării
- Fig.2.9 Domeniile de utilizare a zincului la nivelul anului 2004
- Fig. 2.10 Domeniile de utilizare a zincului la nivelul anului 2008
- Fig.2.11 Domeniile de utilizare a oțelurilor acoperite cu zinc
- Fig. 2.12 Producția și consumul de zinc la nivel mondial
- Fig. 2.13 Producția mondială de zinc pe regiuni
- Fig. 3.1. Principiul sudării tablelor acoperite cu zinc
- Fig 3.2. Geometria rostului la sudarea oțelurilor acoperite cu fascicul laser
- Fig 3.3 Geometria rostului la sudarea prin suprapunere cu fascicul laser
- Fig. 3.4 Îmbinare prin sudobrazare a tablelor galvanizate
- Fig. 3.5. Analiza difuziei elementelor la îmbinarea prin sudobrazare a tablelor galvanizate
- Fig. 3.6 Valoarea durtății la interfața dintre materialul depus și materialul de bază
- Fig. 3.7. Principiul procedurii de sudobrazare
- Fig. 3.8. Dispozitivul de avans sârmă pentru sudobrazarea MIG
- Fig. 3.9. Îmbinare sudobrazată MIG a tablelor zincate
- Fig 3.10 Microstructura de îmbinare sudobrazată MIG
- Fig. 3.11 Modul de transfer al picăturii de metal la procedeul MIG-CMT
- Fig. 3.12. Modul de transfer al picăturii în timp real
- Fig. 3.13. Variația parametrilor în timpul sudării
- Fig. 3.14. Pistoletul TOPTIG
- Fig. 3.15 Performanțele procedurii TOPTIG comparative cu procedeul de sudare MIG pentru diferite materiale
- Fig. 3.16 Modul de transfer funcție de viteza de avans sarma
- Fig. 3.17 Modul de transfer continuu în timpul unui ciclu complet de sudare a tablelor galvanizate folosind sârma de  $\text{CuAl8}$ ,  $\varnothing 1$  mm  $I_s=150\text{A}$ ,  $v_{as}=3.5$  m/min,  $v_s=1$  m/min,  $s=3$  mm
- Fig.3.18 Modul de transfer prin picătură cu picătură la un ciclu complet de sudare a tablelor [20] galvanizate utilizând sârma de adaos  $\text{CuSi3}$   $\varnothing 1$  mm  $I_s=140$  A,  $v_{as}=2$  m/min,  $v_s=1$  m/min,  $s=3$  mm
- Fig. 3.19 Influența vitezei de avans asupra modului de transfer
- Fig. 3.20 Alegerea parametrilor la îmbinarea tablelor galvanizate prin sudobrazare TOPTIG folosind ca material de adaos sârma de  $\text{CuSi3}$  și viteza de îmbinare de 1m/min
- Fig. 3.21 Eficiența îmbinării TOPTIG comparativ cu MIG
- Fig. 3.22 Reprezentare schematică a zonei de sudare la procedeul hibrid laser-MIG

- Fig. 3.23 Modul de transfer la sudarea hibridă laser-MIG  
Fig. 3.24: Geometria îmbinării sudate obținută prin procedeele laser (a), MIG (c) și laser-MIG (b) la aceeași viteză de sudare  
Fig. 3.25 Reprezentare schematică a sudobrazării laser-MIG  
Fig. 3.26 Îmbinare sudobrazată laser-MIG prin suprapunere  
Fig. 3.27 Îmbinare sudobrazată laser-MIG cu margini răsfrânte  
Fig. 3.28 Formarea fazei intermetalice între oțel și aluminiu  
Fig.3.29 Diagrama de echilibru Al-Fe  
Fig.4.1. Oscilograme ale arcului, la sudobrazarea în curent pulsat MIG, utilizând sârma de CuAl8 și gaz de protecție argon,  $t=10\text{ms/cm}$ ,  $U_a=10\text{V/cm}$ ,  $I_s=100\text{A/cm}$   
Fig. 4.2: Imagini ale stratului de zinc MO 500  
Fig. 4.3. Imagini privind măsurarea stratului de zinc MO 500x  
Fig. 4.4 Imagine macroscopică a îmbinării sudobrazate MIG în curent pulsat  
Fig. 4.5 Imagini ale stratului pasivat MO 500x  
Fig. 4.6 Imagini folosite pentru măsurarea straturilor de zinc și oxid  
Fig 4.7 Evidențierea diferenței de grosime dintre stratul de Zn și oxid MO 500x  
Fig. 4.8: Zona influențată termic MO 200x  
Fig. 4.9 Pori în îmbinare MO 200x  
Fig. 4.10: Imagine microscopică a suprafeței îmbinării MO 500 x  
Fig. 4.11 Imaginea macroscopică a îmbinărilor sudobrazate  
Fig. 4.12 Microstructura materialului de bază  
Fig. 4.13 Structura Widmanstätten din ZIT  
Fig. 4.14 Regiunea din ZIT cu granulație fină  
Fig. 4.15 Diagrama de echilibru fazic Cu-Si  
Fig. 4.16 Microstructura îmbinării obținute prin sudobrazare  
Fig. 4.17 Zona de difuzie în materialul de bază  
Fig. 4.18 Determinări de duritate  
Fig. 4.19 Imagini macrostructurale ale suprafeței de rupere  
Fig. 4.20 Imagini microstructurale ale zonei influențate termic  
Fig.4.21. Imagini microstructurale ale îmbinării  
Fig. 4.22 Evidențiere zonă de difuziune a cuprului în materialul de bază  
Fig. 4.23. Imagine microstructurală a zonei adiacente sudobrazării  
Fig. 4.24 Epruvetele încercate la tracțiune  
Fig. 4.25 Instalația de încercare la tracțiune  
Fig.4.26 Încercarea la tracțiune  
Fig. 4.27 Probele supuse la încercarea prin tracțiune  
Fig. 4.28 Zona influențată termic la proba I1  
Fig. 4.29 Zona influențată termic la proba T2  
Fig. 4.30 Zona influențată termic la proba T3  
Fig. 4.31 Aspect îmbinare la proba I1  
Fig. 4.32 Aspect îmbinare la proba T2  
Fig. 4.33 Aspect îmbinare la proba T3  
Fig. 4.34 Curba caracteristică pentru proba I1  
Fig. 4.35: Proba I1  
Fig. 4.36 Curba caracteristică pentru proba I2  
Fig. 4.37 Proba I2  
Fig. 4.38 Curba caracteristică pentru proba T3  
Fig. 4.39 Proba T3  
Fig. 4.40 Schema de principiu a înregistrării curbelor T și TG  
Fig. 4.41 Aspectul curbei termogravimerice TG pentru oxalatul de calciu

- Fig. 4.42 Schema de principiu a obținerii curbelor DTA
- Fig. 4.43 Semnalul analitic în DTA
- Fig. 4.44 Analiza termogravimetrică și termodiferențială a tablei galvanizate
- Fig. 4.45 Analiza termogravimetrică și termodiferențială a tablei galvanizate și pasivate cu  $Cr^{3+}$
- Fig. 4.46 Camera de ceață salină LIEBISCH SL-400
- Fig. 4.47 Îmbinare prin sudobrazare a oțelurilor galvanizate supusă la testului de coroziune în ceață salină
- Fig. 4.48 Imaginea microscopică a îmbinărilor disimilare oțel galvanizat-aluminiu
- Fig. 4.49 Diagrama de echilibru fazic Al-Mg
- Fig. 4.50 Microstructura materialului de bază, MO 500x
- Fig. 4.51 Microstructura îmbinare oțel-material depus, MO 200x
- Fig. 4.52 Microstructura subzonă de îmbinare, MO 500x
- Fig. 4.53 Microstructura subzona îmbinare aluminiu-material depus, MO 100x
- Fig. 4.54 Microstructură îmbinare proba Al6
- Fig. 4.55 Microstructură proba Al6 în zona ruperii
- Fig. 4.56 Curba caracteristică pentru proba Al1
- Fig. 4.57 Proba Al1
- Fig. 4.58 Curba caracteristică pentru proba Al2
- Fig. 4.59 Proba Al2
- Fig. 4.60 Curba caracteristică pentru proba Al3
- Fig. 4.61. Proba Al3
- Fig. 4.62. Curba caracteristică pentru proba Al6
- Fig. 4.63 Proba Al6
- Fig. 5.1 Schematizarea discretizării modelului: a. nodurile modelului, b. elementele modelului
- Fig. 5.2 Detalii privind discretizarea îmbinării
- Fig. 5.3 Distribuția tensiunilor normale pe direcția forței în îmbinare
- Fig. 5.4 Distribuția tensiunilor normale pe direcția perpendiculară pe direcția forței în îmbinare
- Fig. 5.5 Distribuția tensiunilor echivalente,  $\sigma_{ech(5)}$ , în materialul de bază
- Fig. 5.6 Distribuția tensiunilor echivalente, după teoria a-V-a, în îmbinare
- Fig. 5.7 Distribuția tensiunilor normale,  $\sigma_y$ , în materialul de bază
- Fig. 5.8 Deformată modelului și distribuția deplasărilor pe direcția forței
- Fig. 5.9. Schematizarea discretizării modelului
- Fig. 5.10. Detalii privind discretizarea îmbinării
- Fig. 5.11. Distribuția tensiunilor normale în îmbinare pe direcția forței
- Fig. 5.12 Distribuția tensiunilor normale în îmbinare pe direcția perpendiculară forței
- Fig. 5.13 Distribuția tensiunilor echivalente în îmbinare, după teoria a-V-a
- Fig. 5.14 Distribuția tensiunilor normale în îmbinare  $\sigma_y$ , și echivalente,  $\sigma_{ech(5)}$
- Fig. 5.15 Deformată modelului și distribuția deplasărilor pe direcția forței

# 1. INTRODUCERE

La începutul anilor '50 distrugerea prin coroziune a construcțiilor metalice a devenit de neacceptat și pentru a putea crește garanția produselor metalice s-a recurs la protecția oțelurilor împotriva coroziunii. Prin acoperirea oțelurilor cu materiale anticorozive s-a reușit dublarea duratei de viață a produselor metalice.

În acest sens s-au dezvoltat diferite metode de depunere a unor materiale cu proprietăți anticorozive pentru protecția oțelurilor împotriva coroziunii.

La începutul anilor '70 singurul produs acoperit disponibil era cel obținut prin imersare la cald. Acesta se caracteriza prin aspect imperfect, grosimea stratului depus variabilă și utilizarea lui era limitată doar în construcțiile imobiliare.

Primul produs acoperit care a satisfăcut cerințelor producătorilor de automobile s-a dezvoltat în SUA. Era vorba de o tablă din oțel laminat la rece acoperite cu o vopsea bogată în zinc. Stratul acoperit era uniform și avea o grosime de 15 μm.

La începutul anilor '80 se observă o diversificare foarte largă a oțelurilor acoperite în sensul că apar noi tipuri de materiale de protecție obținute prin electrodepunere pe ambele părți, cum ar fi: Zn, Zn-Fe, Zn-Ni.

În prezent producția de table acoperite a crescut foarte mult datorită cerințelor utilizării acestor produse în sectoare ale industriei din ce în ce mai diversificate.

Stratul acoperitor aplicat pe oțeluri creează o barieră între oțel și mediul înconjurător. Această barieră poate să fie activă sau pasivă.

În cazul protecției active este vorba de un metal sau un compus metalic care exercită o protecție sacrifiantă față de oțel. Protecția oțelului depinde de grosimea stratului acoperitor și de viteza de degradare a acestuia într-un anumit mediu. În cele mai multe cazuri se utilizează zincul și eventual zincul în aliaj cu alte elemente metalice, care diminuează viteza de degradare a stratului acoperitor.

De asemenea se poate ameliora acest efect printr-un tratament de conversie cum ar fi: cromatarea sau fosfatarea.

În cazul protecției pasive se utilizează un metal mai nobil decât oțelul, care este de obicei un material organic.

În practică se utilizează ambele tipuri de protecție. Protecția activă presupune un strat acoperitor de grosimi mai mari.

Diversele tipuri de oțeluri acoperite se clasifică după mai multe criterii astfel:

- după natura stratului acoperitor:
  - metal pur: zinc, aluminiu;
  - aliaje: Zn-Fe, Zn-Ni, Al-Si, Pb-Sn, Zn-Al;
  - multistrat: Zn-Ni + strat acoperitor de natură organică;
- după modul de obținere:
  - imersare în metal topit;
  - galvanizare;
  - vopsire;
  - difuzie etc.

Zincul oferă în același timp o barieră între metalul de bază și mediul ambiant, precum și o protecție catodică.

În prezent materialele metalice sunt folosite cu cea mai importantă rată de aplicabilitate ca materiale de construcție.

Folosirea efectivă a materialelor trebuie să se bazeze pe cunoașterea aprofundată a particularităților metalurgice, proprietăților fizico-mecanice și a rezultatelor interacțiunii cu mediul de expunere. Dacă proprietățile fizice și mecanice pot fi exprimate prin constante caracteristice, proprietățile chimice sunt dependente de mediul cu care metalul vine în contact.

În atmosferă, zincul este mai rezistent decât oțelul, iar acoperirea produselor siderurgice cu zinc este considerată ca fiind varianta de protecție cea mai economică împotriva coroziunii atmosferice. Această proprietate a zincului, respectiv rezistența la coroziune atmosferică, a determinat ca producția și consumul de zinc să crească spectaculos în ultimii ani. În prezent zincul se află pe locul patru în industria mondială consumatoare de metal după fier, aluminiu și cupru, devenind astfel metalul indispensabil industriei moderne.

Din punct de vedere metalurgic două caracteristici specifice conferă zincului o anumită particularitate: temperatura de topire și sistemul de cristalizare. Temperatura de topire de 419°C determină ca procesul de recristalizare a zincului să se desfășoare la temperaturi cuprinse în intervalul 50-100°C.

Cele mai reprezentative metode de obținere a oțelurilor acoperite, precum și principalele tipuri de oțeluri acoperite au fost prezentate și tratate în capitolul 2.

Ca etapă de pornire s-au obținut probe de oțel galvanizat la firma Westmetal SRL Timișoara prin metoda de electrozincare, galvanizare, pe diferite grosimi de oțel de uz general. Fluxul tehnologic al probelor astfel obținute este prezentat în capitolul 2 al tezei.

Capitolul 3 cuprinde o inventariere a procedeelor de sudare/îmbinare a oțelurilor acoperite. Sunt prezentate recomandările tehnologice care să permită realizarea de îmbinări între oțelurile galvanizate și îmbinări disimilare oțel galvanizat – aluminiu.

Capitolul 4 se referă la elaborarea de tehnologii de îmbinare prin procedeul de sudobrazare utilizând echipamentul de sudare EWM Pheonix 300 din dotarea catedrei și echipamentul Fronius Trans Pus Synergic 2700 CMT.

Experimentările desfășurate în cadrul tezei de doctorat, au constatat în elaborarea tehnologiilor de îmbinare, analiza macro și microstructurală a probelor îmbinate din oțel acoperit prin galvanizare cu zinc și a probelor îmbinate dintre oțel galvanizat și aluminiu, urmate de probe de încercări mecanice.

Procedeul de îmbinare, pentru care s-a optat constă în îmbinarea materialelor prin sudobrazare cu material de adaos, ce are temperatura de topire mai mică decât cea a materialului de bază. De menționat că acest procedeu este utilizat în tot mai mare măsură la îmbinarea tablelor subțiri, de același tip sau disimilare în general și în particular la îmbinarea tablelor galvanizate, datorită avantajelor de necontestat pe care le prezintă. Aceste avantaje constau în obținerea de îmbinări cu aport termic scăzut fapt care conduce la modificări minime metalurgice, deformații minime, distrugerea nesemnificativă a stratului de zinc în condițiile în care întregul proces are loc în condiții de protecție ambientală.

Tot în capitolul IV este prezentat programul de încercări. Acest program a inclus examinări metalografice realizate conform standardelor europene în vigoare cu ajutorul microscopului optic metalografic Olympus BX51M, puterea de mărire 50-1000 X, dotat cu cameră digitală și sistem digital de achiziție și prelucrare a imaginilor. Multiplele micro-macro structuri examinate au evidențiat condițiile de apariție a defectelor. Analizarea cauzelor care au condus au creat premiza asigurării de condiții tehnologice pentru evitarea apariției lor.

Programul experimental s-a finalizat prin încercări mecanice de tracțiune pe probele îmbinate prin sudobrazare din oțel galvanizat și din oțel galvanizat cu aluminiu.

Totodată s-a efectuat, în capitolul 5, în completarea celor aflate/oferte de încercările mecanice o analiză cu elemente finite prin care se urmărește să se determine distribuția tensiunilor și deformațiilor, în elementele îmbinării pentru diverse cazuri de încărcare.

Autorul aduce mulțumiri cadrelor didactice din Facultatea de Mecanică, din cadrul Catedrei Știința Materialelor și a Sudării care m-au sprijinit în realizarea acestei teze de doctorat.

Cu această ocazie doresc să-mi exprim mulțumirile mele domnului profesor LIVIUS MILOȘ - conducătorul științific al tezei – pentru propunerile, sugestiile și observațiile făcute privind sistematizarea datelor, informațiilor și rezultatelor în elaborarea tezei.

## **2. OBȚINERE, PROPRIETĂȚI, DOMENII DE APLICABILITATE ALE OȚELURILOR ACOPERITE**

### **2.1. Metode de obținere a oțelurilor acoperite**

Principalele metode de depunere a straturilor acoperitoare pe oțeluri utilizate în protecția anticorozivă sunt:

- imersare în metal topit;
- pulverizare de metal topit;
- sudare prin topire;
- laminare;
- explozie;
- vaporizare în vid;
- difuziune termică;
- galvanizare;
- pulverizare catodică;
- implantare de ioni.

#### **2.1.1 Acoperirea prin imersare în metal topit**

Procedeele de imersare în metal topit este unul dintre cele mai vechi procedee de depunere a straturilor metalice pe suport metalic și se aplică pieselor sau semifabricatelor prin imersarea lor în metalul de acoperire lichid, încălzit cu 30-50°C peste temperatura sa de topire, menținerea un timp îndelungat astfel încât să se formeze legătura de aderență între metalul de acoperire și suport și extragerea din baie cu îndepărtarea surplusului de metal lichid.

Condiția de bază pentru realizarea depunerii este ca cele două metale să formeze aliaje. Se acoperă astfel oțelurile carbon de uz general, oțelurile pentru table subțiri, benzi, benzi late și țevi. Stratul de acoperire se fixează pe metalul suport prin legături intermetalice, care se formează prin difuziunea atomilor din topitură în rețeaua structurală a suportului, legături care ideal comportă o fază de soluție solidă.

Din motive de limitare a încălzirii piesei, în timpul imersării care poate provoca modificări ale compoziției chimice, structurii, dimensiunilor, proprietăților de rezistență mecanică și ale stării de tensiune, se folosesc ca metale de acoperire numai metalele cu temperatura relativ scăzută de topire cum ar fi :

- zincul, cu temperatura de topire 419° C;
- aluminiul cu temperatura de topire 659° C;
- staniul cu temperatura de topire 232° C;
- plumbul cu temperatura de topire 237,5° C.

Dintre aceste materiale se detașează zincul prin imensa cantitate de metal consumată anual pe glob pentru acoperiri prin imersare: aprox. 1,4 mil. tone. Cu aceasta valoare zincul este metalul de acoperire cel mai frecvent utilizat.

În tabelul 2.1 se prezintă indicele de adâncime pentru coroziunea în atmosferă a acoperirilor realizate prin imersare în metal topit. O caracteristică

comună pozitivă a comportării la coroziune a celor 4 metale este că atacul atmosferic se realizează cu mici excepții, continuu pe suprafață.

Tabelul 2.1 Indicele de adâncime pentru coroziune în atmosferă a straturilor depuse prin imersare în metal topit [67]

Tipul atmosferei	Indicele de adâncime pentru metalul acoperitor [ $\mu\text{m}$ ]			
	Zinc	Aluminiu	Staniu	Plumb
Rurală	1-4	< 0,5	< 2	< 2
Urbană	1-6	0,1-1	2-8	< 2
Marină	1-7	0,5-1*	1-3	< 2
Industrială	4-13	1-2	1-3	< 4

\* - coroziune în puncte

### 2.1.2 Acoperirea prin pulverizare termică

Procedeul de acoperire prin pulverizare termică consta în topirea materialului de acoperire, pulverizarea sa în picături fine și transportul acestora spre suprafața suport, suprafață pe care se vor solidifica și răci, formând stratul depus.

Avantajele nete ale procedurii fata de alte procedee de depunere a straturilor metalice constau în:

- mobilitatea mare prin faptul că instalațiile sunt portabile;
- economicitate;
- posibilitatea acoperirilor suprafețelor de configurație complexă cu o mare varietate de materiale.

Straturile depuse prin pulverizare pot îndeplini o multitudine de funcțiuni dintre care se disting :

- rezistența la uzare;
- rezistența la temperaturi înalte;
- rezistența la coroziune.

Principalele procedee de acoperire prin pulverizare termică sunt următoarele :

- pulverizarea cu flacără de gaz materialul de acoperit poate fi sub forma de: pulbere, sârma sau vergea;
- pulverizare cu arc electric; materialul de acoperit este sub forma de sârma sau vergea;
- pulverizare cu plasmă; materialul de acoperit este sub forma de pulbere.

În tabelul 2.2 sunt prezentate date privind procedeele de acoperire prin pulverizare termică.



Tabelul 2.2 Procedee de acoperire prin pulverizare termică [67]

	Flacără	Jet de plasmă	Cu arc electric
Sursa termică	Oxigen + acetilena, Oxigen + propan	Curent electric + gaz inert	Curent electric
Particularități			
Materialul de adaos	Metale, ceramice, compozite	Metalice, ceramice, compozite	Metale
Forma materialului de adaos	Pulberi, sârmă	Pulberi	Sârmă
Temperatura de lucru, °C	2600-3100	20000	4000-6000
Metoda de atomizare	Aer comprimat	Preatomizare	Aer comprimat
Viteza particulei, m/s	90-100	600	150-300
Rata depunerii, Kg/h	1-10	0,5-10	1-50

### 2.1.3 Acoperirea prin sudare prin topire

Straturile depuse prin acest procedeu de acoperire fac parte din categoria straturilor depuse prin placare. Prin placare se înțelege atașarea unui strat metalic numit placaj la suprafața materialului metalic suport. Ansamblu format din suport și materialul metalic acoperitor formează un bimetal. Fiind caracterizat de aderența bună, grosime și densitate mare, placajul are o rezistență foarte bună la coroziune în prezența solicitărilor de eroziune sau la uzare. Deoarece din motive tehnologice și economice depunerea se realizează pe suporturi de grosime relativ mare, piesele construite din bimetal au o stabilitate geometrică ridicată, ceea ce le recomandă a fi utilizate în industriile de proces în condiții de presiune constantă sau alternantă. De obicei se plachează virole, capace de recipiente utilizate în industria chimică din oțeluri pentru cazane și recipiente sub presiune.

Placarea prin sudare prin topire constă în topirea simultană totală a materialului acoperitor și parțială a materialului de bază, depunerea primului pe suprafața topită de o adâncime mică a materialului de bază și solidificarea băii metalice comune astfel obținute cu formarea unor legături intermetalice între cele două materiale.

Procedeele de placare prin sudare prin topire mai importante sunt:

- sudarea sub strat de flux;
- sudarea în mediu de gaz protector, MIG/MAG, sudare cu plasma;
- sudare în baie de zgura.

În tabelul 2.3 sunt prezentați indicatorii tehnologici, h-supraînălțare, D-diluția, Q-energia specifică, P-productivitate, a procedeelelor de încărcare prin sudare.

Tabelul 2.3 Indicatorii tehnologici ai procedeelor de placare prin sudare

Procedeu	h mm	D %	Q j/mm <sup>2</sup>	P kg/h
Sudare sub strat de flux	5-8	13-40	175	10-40
Sudare în baie de zgură	4-5	10-15	190	15
Sudare MIG/MAG	4-8	15-25	160-185	8-9
Sudare cu plasmă	4-6	10-20	155	5-20

### 2.1.4 Acoperirea din stare solidă

Acoperirile din stare solidă sunt plăcări realizate prin procedeele tehnologice de:

- laminare;
- explozie;
- combinat, prin explozie urmată de laminare.

Toate procedeele enumerate depun placaje, au ca rezultat bimetale asemenea procedeelor de acoperire prin sudare. Acoperirea în stare solidă se aplică numai semifabricatelor tablă, bandă și bandă lată din oțeluri pentru cazane și recipiente sub presiune utilizate într-un domeniu larg de temperaturi, din oțeluri de granulație fină și din oțeluri aliate.

Legătura între suport și placaj se realizează prin deformarea lor plastică, care determină atomii de suprafață ai placajului să se apropie de atomii de suprafață ai suportului la distanțe egale cu parametrul rețelei, rezultatul fiind o interacțiune energetică a lor.

Procedeul de placare prin laminare constă în laminarea ansamblului de table suprapuse suport + placaj la o temperatură, funcție de materiale, de 600-1200°C. Legătura este finalizată printr-un tratament termic în cuptor, care facilitează difuziunea atomilor celor două rețele și crearea cristalelor comune aliate. Procedeul este aplicabil numai perechilor de materiale care nu formează faze intermetalice dure în urma topirii și solidificării sau în urma difuziunii.

La procedeul de placare prin explozie tabla din material de acoperire, aflată inițial deasupra tablei suport, în poziție paralela cu aceasta este acoperită cu un material exploziv. Prin detonare, materialul de acoperit este deplasat cu viteză mare, 100-1000m/s, spre suport, unde, prin deformare plastică se realizează apropierea atomilor marginali ai celor două materiale la distanțe egale cu parametrul rețelei, fig. 2.1. Între acestea se formează o legătură metalică într-o zonă de grosime foarte mică, care are o rezistență mecanică ridicată. Procedeul este aplicabil tuturor perechilor de materiale utilizate la construcția bimetalelor. Se aplică cu precădere la placarea materialelor care nu se pot placa prin laminare.

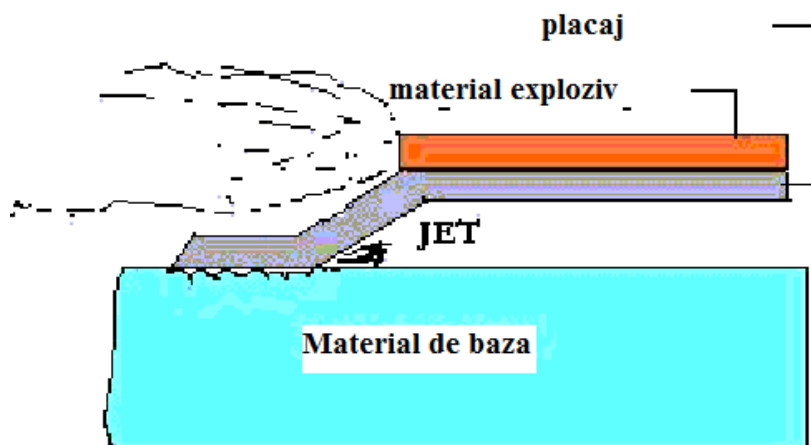


Fig. 2.1 Principiul placării prin explozie

Placarea în stare solidă combinată constă în două faze:

- placarea prin explozie rezultând semifabricate bimetalice de suprafață relativ mică;
- mai multe semifabricate placate obținute la faza anterioară sunt depuse alături unul de altul apoi sunt unite prin laminare obținându-se astfel un ansamblu de trei materiale metalice suprapuse.

### 2.1.5 StratURI de difuziune termica

Prin difuziunea unor atomi metalici sau ai unor nemetalici anorganici în stratul de suprafața al unui corp metalic acesta se îmbogățește în aceste elemente, fără a se modifica dimensiunile corpului. Straturile de difuziune sunt subțiri și poroase, de duritate relativ mare și de rezistență bună la coroziune în condiții de temperatură ridicată. Ele nu se pot separa de suport pentru că sunt parte din aceasta.

Procedeul se aplică aliajelor fierului și nichelului. Condiția de realizare a straturilor de difuziune termică cu metalele este ca metalul de bază și metalul care difuzează să formeze soluții solide. Fierul poate realiza soluții solide cu 15 elemente, dintre care cele mai importante sunt soluțiile solide ale fierului cu: zincul, aluminiul și cromul.

### 2.1.6 Acoperirea electrolitică, prin galvanizare

Prin electroliză ionii metalici ai sărurilor aflate în soluție se depun pe suprafețele electroconductoare. Corpul care urmează să fie acoperit se conectează la catodul instalației de electroliză, fiind imersat în electrolit. Anodul care este de asemenea imersat în electrolit este un corp metalic solubil sau insolubil electrochimic. La electroliza cu anod acesta este confecționat din metalul de acoperire, cazul cuprării, nichelării, zincării. Acesta, prin dizolvare anodica își pierde

ionii, care se deplasează în câmpul electrostatic din electrolit spre catod, pe care se depun, iar în urma reducerii se neutralizează. La electroliza cu anod insolubil anodul este confecționat dintr-un material având suprafața electroconductoare, care nu este atacat în condițiile de lucru, cazul cromării.

Prin conducerea adecvată a proceselor de depunere se pot realiza și acoperiri metalice aliate sau acoperiri formate dintr-o matrice metalică conținând adaosuri sub forma de particule fin dispersate într-o combinație de materiale incompatibile de a forma un aliaj. Galvanizarea este procedeul cel mai frecvent utilizat în depunerea straturilor metalice în scopul protecției anticorozive, dar modificarea proprietăților suport prin galvanizare poate avea și alte scopuri importante. În tabelul 2.4 se prezintă exemple ale modificării proprietăților prin diferite procedee de galvanizare.

Tabelul 2.4 Exemple ale funcțiilor straturilor galvanice [67]

Proprietatea	Strat galvanic
Rezistență la coroziune	Zincare, cromare
Duritate	Cromare
Umectare	Cromare
Conductibilitate electrică	Cuprare, argintare
Conductivitate termică	Cuprare
Coeficient mic de frecare	Nichelare, argintare
Reflexivitate	Argintare, aurire
Capacitate de lipire cu aliaje metalice	Zincare

### 2.1.6.1 Condiții de acoperire electrolitică

Condiția principală pe care trebuie să o îndeplinească suportul care se acoperă prin galvanizare este ca suprafața sa să fie electroconductoare. Dacă materialele metalice nu ridică probleme din acest punct de vedere, materialele nemetalice dielectrice pot fi acoperite prin galvanizare numai după acoperirea lor cu pelicule din materiale electroconductoare. Condiția principală pe care trebuie să o îndeplinească metalul care se depune este să se afle în soluție sub formă ionică, deoarece principiul electrolizei se bazează pe principiul deplasării în câmp electric a ionilor metalici de la anod la catod. Majoritatea soluțiilor electrolitice sunt pe baza de apă. În unele cazuri, mai ales la depunerea metalelor puternic electronegative (Al) nu se pot folosi soluții apoase pentru că după depunerea lor la catod acestea se oxidează. În acest caz se folosesc topituri sau soluții organice ale sărurilor metalelor.

Funcție de existența unor factori perturbatori ai procesului de galvanizare, acoperirile se depun în straturi de grosime mai mult sau mai puțin neuniformă. Acești factori sunt favorizați de neuniformitățile suprafețelor suportului, muchi, colțuri, cavități, orificii și proeminențe.

Depunerile sunt mai intense pe proeminențele suprafeței și mai atenuate în cavități, abaterile grosimii straturilor de la uniformitate fiind urmare a neuniformității câmpului electric între anod și piesă, neuniformitate determinată de variația locală a distanței între anod și catod. Abaterile de la uniformitate ale

câmpului mai depind și de proprietățile electrolitului prin capacitatea de dispersare, care cu cât este mai mare cu atât câmpul electric este mai uniform, indiferent de gradul de profilare a suprafeței piesei. Aceasta depinde de ionul metalului de acoperire și de rețeta electrolitului. Capacitate de dispersare singură nu poate anihila total abaterile de la uniformitate ale grosimii acoperirii pe o piesă. Acestea mai pot fi micșorate prin montarea mai multor anodi în jurul piesei, prin utilizarea unor anodi profilați, care să asigure o distanță constantă între anod și suprafața suportului pe întreaga arie de acoperit sau prin montarea unor ecrane de atenuare a câmpului electric în zonele unde acesta este mai puternic.

Electrolizii conțin, pe lângă sărurile metalelor care se depun, adaosuri de substanțe anorganice și organice pentru îmbunătățirea capacității de dispersare, a conductibilității electrice, împiedicarea precipitării, precum și substanțe pentru influențarea directă a proprietăților straturilor depuse: luciu, aderență, porozitate, duritate sau rugozitate.

Factorii care influențează procesul galvanizării sunt factori dependenți de:

- suportul pe care se face depunerea;
- tratamentul preliminar al suprafeței suport;
- parametrii regimului de galvanizare;
- parametri constructivi și tehnologici ai instalației de galvanizare;
- parametrii tratamentului ulterior galvanizării.

Factorii care influențează calitatea acoperirii prin galvanizare sunt:

- materialul;
- forma și calitatea suprafeței suportului;
- calitatea îndepărtării impurităților și rugozitatea suprafeței suportului;
- procedeul de galvanizare (stativ, tambur, continuu);
- densitatea;
- amplasamentul și deplasarea pieselor în baie;
- compoziția chimică;
- temperatura și circulația electrolitului;
- densitatea de curent;
- repartiția câmpului electric;
- tratamentul ulterior, lubrifiere, pasivare etc.

### **2.1.6.2 Proprietățile straturilor depuse prin galvanizare**

Straturile depuse prin galvanizare au în mod obișnuit grosimea de 5-25μm. Grosimea lor relativ mică față de straturile metalice depuse prin imersare în metale topite, prin pulverizare sau prin placare, determină economicitatea lor și posibilitatea de a le utiliza la acoperirea unor piese de precizie mai ridicată.

Structura lor este cristalină, mărimea cristalelor depinzând de capacitatea de formare a germenilor viitorului strat și de viteza de creștere a cristalelor. O capacitate mare de formare a germenilor însoțită de o viteză redusă de creștere a cristalelor determină formarea unei structuri fine, iar o capacitate mică de formare a germenilor cuplată cu o viteză mare de creștere a cristalelor determină formarea unei structuri grobe.

Lipsa unor legături intermetalice între stratul depus și suport determină aderențe relativ slabe. Legăturile intermetalice nu se pot forma deoarece procesul de galvanizare se desfășoară la o temperatură de câteva zeci de grade Celsius, ceea ce, pe de altă parte constituie un avantaj pentru materialele de bază sensibile la

cicluri termice. Slaba aderență în prezența tensiunilor interne favorizează exfolierea depunerilor galvanice.

Deși straturile depuse prin galvanizare sunt tensionate, ele au o oarecare ductilitate ceea ce le permite deformarea plastică cu grade mici până la medii de deformare. Astfel semifabricatelor galvanice li se pot aplica procedeele de îndoire și ambutisare. Acoperirea poate fi realizată înaintea deformării plastice prin ambutisare sau îndoire, dar se recomandă să urmeze debitării prin stanțare a semifabricatelor. Dacă acoperirea se face înaintea stanțării, atunci în urma debitării vor rămâne muchi neacoperite, neprotejate.

### 2.1.6.3 Instalații și dispozitive pentru galvanizare

Procedeele galvanice se desfășoară industrial în instalații cu diferite grade de mecanizare și de automatizare, care în general conțin și zonele de tratament preliminar chimic sau electrochimic, de spălare precum și zona de tratament final. Tablele pot fi acoperite atât pe o singură parte, cât și pe ambele părți, fig. 2.2. Funcție de mărimea lor, piesele pot fi:

- fixate și poziționate pe stative care se introduc nemijlocit în electrolit;
- introduse în tamburi care se rotesc în imersiune în electrolit, piese mici.

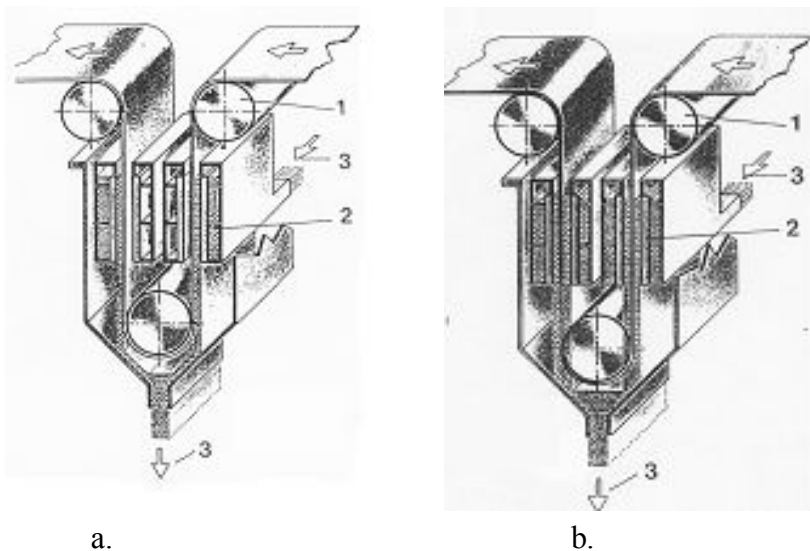


Fig. 2.2. Instalație pentru galvanizare [81]

a. -acoperire pe o singură parte, b. - acoperire pe ambele părți, 1-role de antrenare, 2- anod, 3-admisie, evacuare electrolit

Cuvele sunt constituite din tabla din oțel inoxidabil sau din oțel nealiat căptușit în interior cu tablă din oțel anticoroziv sau inoxidabil, sau căptușit cu plăci din material plastic, având pereți dubli și serpentine prin care circulă apa pentru asigurarea regimului termic necesar procesului. Este importanta realizarea contactului electric intim între anodi, respectiv, catod și cablurile electrice, pentru a nu apărea pierderi de energie. Piesele de contact suferă și ele acoperiri, care pot mări rezistența electrică; astfel ele trebuie înlocuite periodic sau straturile

acoperitoare trebuie îndepărtate periodic. La galvanizarea în tamburi rotitori, contactele electrice la acestea sunt alunecătoare, cu perii. De asemenea este importantă alegerea mărimii, densității și amplasării perforațiilor tamburilor.

Sistemul pentru asigurarea energiei electromagnetice conține sursa electrică, cabluri și instrumente de măsură, ale căror indicații dau informații asupra variației parametrilor electrolitului.

Acoperirea prin galvanizare presupune parcurgerea următoarelor etape :

- aprovizionare;
- fabricarea suportului;
- prelucrare mecanică;
- degresare;
- spălare;
- curățare cu acizi;
- depunerea electrochimică;
- spălare;
- uscare;
- tratament de maleabilizare;
- acoperire ulterioară;
- depozitare.

## 2.2 Tipuri de oțeluri acoperite

### 2.2.1 Oțeluri acoperite prin zincare termică

Piesele din oțel sunt imersate în zincul topit la temperatura de  $455+5^{\circ}\text{C}$ . Zincul topit reacționează cu fierul și formează o serie de aliaje Fe-Zn care dau o depunere chiar mai dură decât a oțelului normal. Reacțiile chimice care au loc în timpul procesului de zincare termică se desfășoară astfel încât fiecare strat de aliaj Fe-Zn fuzionează cu următorul, formându-se un strat acoperitor de compoziție intermetalică, metalurgic legată de oțel care face parte integrantă din produsul complet. Acțiunea de aliere continuă până când piesa este extrasă din baia de zincare moment în care se formează în final un strat de zincare pur la suprafață.

Când piesele din oțel se imersează în topitura de zinc se produc o serie de reacții între fier și zinc, în etape diferite, formându-se o acoperire cu compoziție intermetalică. Aceasta este compusă din straturi de aliaje diferite constituite din diverse faze Fe-Zn, respectiv:

- *Faza gama*,  $\gamma$ , care constituie stratul de aderență din imediata apropiere a fierului, foarte subțire ca grosime și cu proprietăți plastice;
- *Faza delta*,  $\delta$ , constituie stratul de legătură pentru acoperiri aderente și care este o fază dură și fragilă;
- *Faza zeta*,  $\zeta$ , cu structură colunară, dură și fragilă ce trebuie menținută pe cât posibil subțire pentru realizarea unei acoperiri de protecție ductilă;
- *Faza eta*,  $\eta$  constituită din zinc pur având aceeași compoziție cu a băii de zincare.

În figura 2.3 se prezintă structura acestor straturi la imersarea zincului.

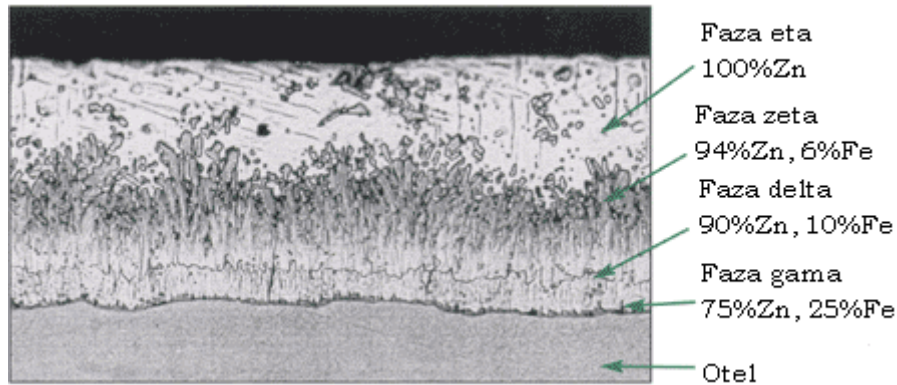


Fig. 2.3. Structura straturilor la imersarea zincului [119]

Grosimea diferitelor faze și grosimea totală a acoperirii depinde de o serie de factori cum ar fi:

- calitatea oțelului;
- puritatea zincului;
- temperatura băii de zincare;
- durata de imersie și extragere din baie.

Fiecare fază intermetalică poate fi determinată prin difracție cu raze X la un unghi cuprins între  $72-80^{\circ}2\theta$ , figura 2.4.

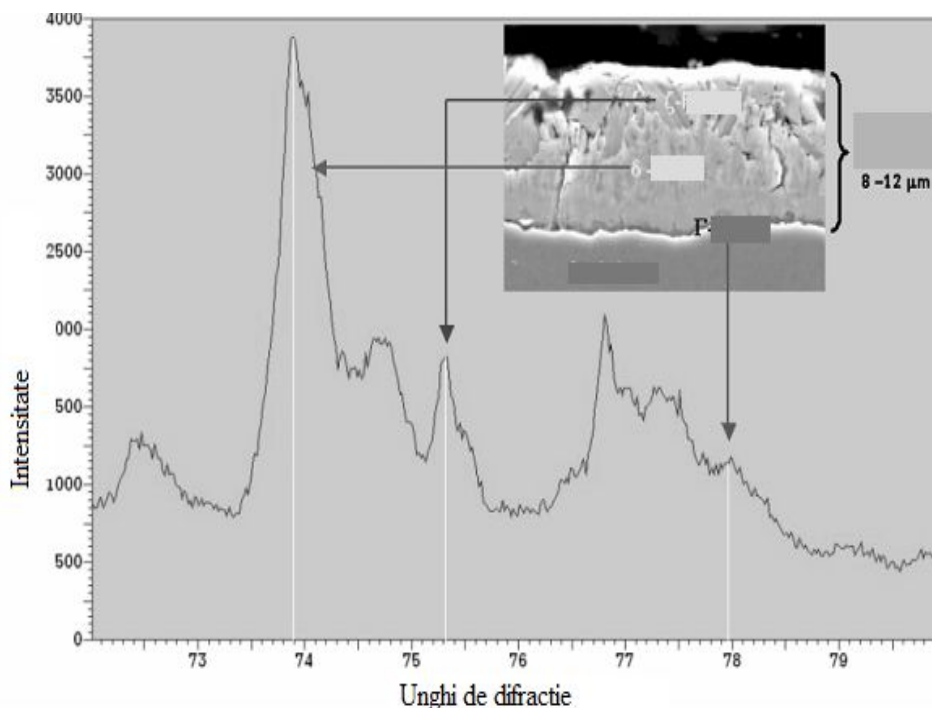


Fig. 2.4 Difracția cu raze X a oțelurilor zincate [119]



Fiecare poziție de vârf și intensitatea semnalului depinde de fiecare caracteristică a stratului de aliaj Fe-Zn. Variația intensității semnalului nu este liniară cu grosimea stratului. Acesta este influențat de absorbția în material și de geometria stratului.

În mod uzual grosimea acoperirii obținute prin zincare termica este cuprinsa între 70-150 $\mu$ m.

Procedeul tehnologic se poate aplica:

- în mod continuu, pentru semifabricate lungi;
- în mod discontinuu pentru piese de mărime mijlocie sau mică.

În figura 2.5 se prezintă modul discontinuu de aplicare a imersării zincului, iar în figura 2.6 modul continuu.

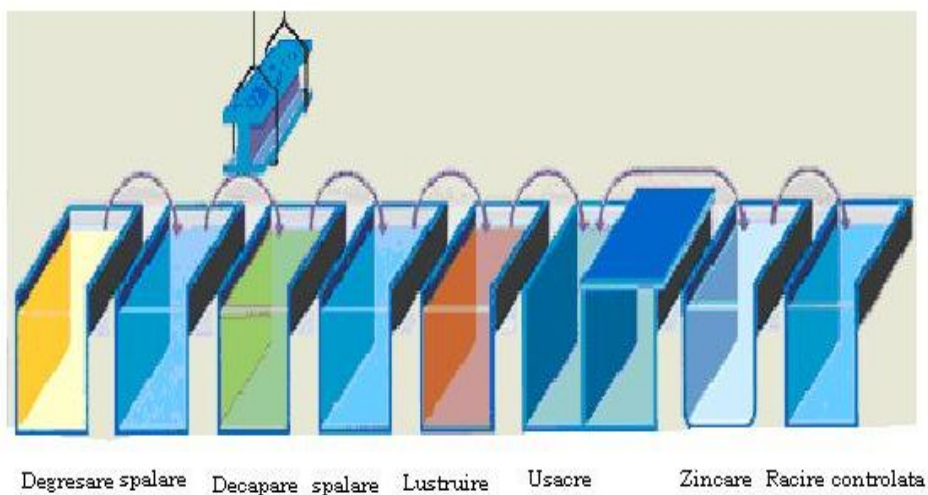


Fig. 2.5 Fazele tehnologice de imersare a zincului în mod discontinuu [65]

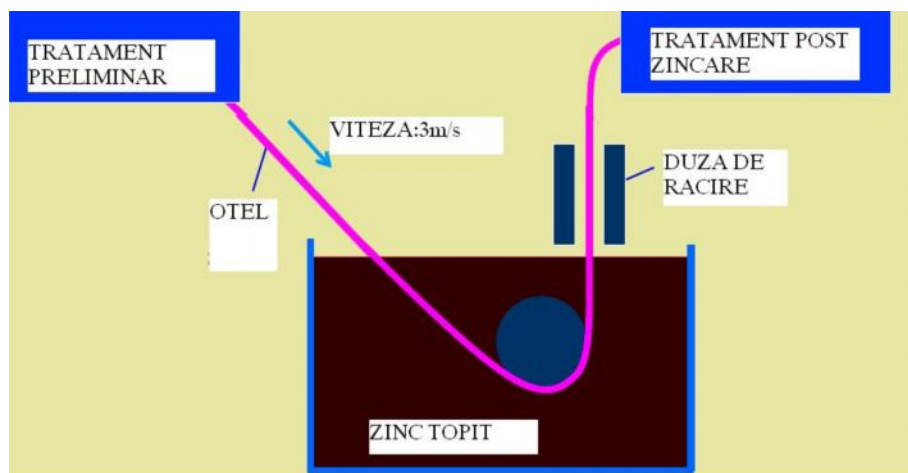


Fig.2.6 Imersarea zincului în mod continuu [65]

Funcție de variantă, durată, diferă grosimea stratului depus. Deosebirea se datorează duratei de menținere în imersiune, care influențează procesele de difuziune dintre metalul suport și cel de acoperire. La varianta depunerii prin imersare continuă, duratele sunt de 5-20s, iar la imersarea discontinua sunt 30-100s. Astfel în primul caz se obțin acoperiri mai subțiri, de grosime 30- 60 $\mu$ m, cu faze intermetalice zeta și delta mai subțiri decât în cazul al doilea. În urma acoperirii prin imersare discontinua, se obțin grosimi totale ale stratului de maximum 200 $\mu$ m. Aceste deosebiri determina comportarea diferita la deformare plastică a pieselor zincate, funcție de varianta procedului de zincare. Semifabricatele acoperite prin procedeul discontinuu au o deformabilitate foarte bună, în timp ce piesele acoperite prin procedeul discontinuu au o deformabilitate foarte slabă, chiar nulă. În ambele variante acoperirile au o mare durabilitate în medii agresive.

Zincul depus prin imersare protejează în atmosfera de orice fel, în apa și în sol.

În apa potabilă până la temperatura de 60°C zincul se acoperă cu un strat protector care conține produși de coroziune ai zincului și fierului din aliajul Fe-Zn al stratului acoperitor. Capacitatea protectoare a stratului este slăbită de bioxidul de carbon dizolvat în apă. La temperatura mai mare produsul de coroziune al zincului nu este protector chiar în absența bioxidului de carbon, deci trebuie evitat contactului pieselor zincate cu apa potabilă caldă. Funcție de pH, zincul are o comportare excelentă în domeniul pH 7-12. Se recomandă ca țevile pentru transportul sub presiune a apei potabile să fie zincate în mod discontinuu.

În sistemele deschise ale schimbătoarelor de căldură, piesele zincate se comportă mai bine decât în apă potabilă, deoarece conținutul de bioxid de carbon al apei este limitat tehnologic.

În sistemele închise cu apă rece sau apă caldă bioxidul de carbon și oxigenul sunt rapid consumate, astfel încât coroziunea este neglijabilă, dar poate să sufere o accelerare numai dacă se dezvoltă hidrogen. În acest scop instalațiile sunt prevăzute cu dispozitive pentru aerisire.

Oțelul zincat rezistă bine la apele reziduale din gospodării. Apele cu grad mic de duritate, <2, au o acțiune distrugătoare asupra stratului protector, de aceea în

apele cu duritate redusă și  $\text{pH} < 7$  stratul de zinc trebuie protejat suplimentar cu vopsele.

Datorită potențialului negativ al zincului în recipientele zincate se dezvoltă elemente locale de coroziune la contactul între zinc și ionii metalici mai electropozitivi care sunt aduși în apă, rezultatul fiind corodarea zincului. Pentru evitarea acestei situații se evită amplasarea în amonte a pieselor de stocare și aducție ale apei din metale mai electropozitive decât zincul, sau apa se tratează cu inhibitori, fosfați sau silicați. Procesul coroziv nu se dezvoltă dacă pe stratul de zinc sunt precipitate sărurile care conferă duritatea apei. Condensul influențează negativ rezistența la coroziune a zincului, în măsura în care conține  $\text{CO}_2$  dizolvat provenit din atmosfera și pentru că acționează asupra metalului simultan cu o diferență de aerare [67].

În sol, stratul de zinc depus prin imersiune se corodează continuu, cu o pierdere anuală în medie de  $14\text{--}21 \text{ g/m}^2$ , corespunzător unui indice de adâncime de  $2\text{--}3 \mu\text{m/an}$ . Oțelul acoperit prin acest procedeu nu se corodează local nici în locurile unde stratul de zinc a fost exfoliat, pentru ca zincul rămas pe porțiunile vecine asigura și protecția oțelului din zonele neacoperite. Această proprietate a acoperitor metalice cu zinc și a acoperirilor cu aliaje care conțin zinc constituie protecția anticorozivă la distanță și după degradarea prin coroziune a întregului strat de zinc, coroziunea oțelului se desfășoară lent pentru că suprafața sa este încă protejată de zincul din producția de coroziune. O corodare puternică a zincului se produce la stâlpi în zona de ieșire din sol, datorită diferenței valorilor potențialului oțelului zincat în sol și în aer și a umidității mari în această zonă. Procesul se întâlnește și la traversarea zonei beton-sol și aer-beton, în vecinătatea zonei de trecere, pe o distanță de  $300\text{mm}$  de fiecare parte a suprafeței de separare a celor două medii. Stratul de zinc acoperitor trebuie izolat de mediu cu materiale electroizolante impermeabile: straturi de vopsea, manșoane, înfășurări.

Importanța zincului ca material de protecție anticorozivă pentru oțeluri se bazează pe trei proprietăți:

- zincul formează în condiții normale de mediu, straturi acoperitoare rezistente: oxid de zinc, carbonați de zinc insolubili;
- datorită potențialului electrochimic scăzut al zincului în comparație cu fierul, în cazul unei degradări a stratului de zinc, se poate aplica în mod eficient o protecție catodică;
- zincarea la cald prin imersare reprezintă un procedeu simplu din punct de vedere tehnic, cu care se poate obține un înveliș protector de zinc uniform și aderent, chiar și în cazul structurilor mai complicate.

Oțelurile nealiate și slab aliate folosite în mod curent în construcțiile metalice sudate sunt cele mai potrivite pentru a fi zincate. Caracteristicile procesului de zincare la cald, respectiv structura stratului de zinc, aspectul suprafeței și aderența stratului de zinc sunt dependente de compoziția chimică a oțelului, de procedeu de sudare și de condițiile din baia de zincare.

Mecanismul reacțiilor dintre materialele feroase și zincul lichid este foarte complicat. Oțelurile nealiate cu un conținut de siliciu cuprins între  $0,03$  și  $0,12 \%$ , precum și cele cu peste  $0,3\%$  Si, tind să formeze în baia de zincare straturi mai groase de aliaje de fier și zinc, datorită vitezelor mari ale reacțiilor. La oțelurile cu conținut de siliciu sub  $0,03\%$  aceste reacții pot fi favorizate de un conținut ceva mai ridicat de fosfor [65].

Referitor la formarea unor straturi mai groase sub influența siliciului, s-a observat că acele suduri care au fost nivelate din motive constructive sau estetice, apar din nou proeminente după zincarea la cald. Aceste zone nu prezintă o

rezistență anticorozivă mai scăzută, dar pot avea o aderență mai slabă și pot să se desprindă în urma unor solicitări mecanice, ca de exemplu sudurile în colț.

După zincare la cald, în condiții normale, stratul de zinc prezintă o aderență bună față de suprafața construcției din oțel. Dacă anumite componente ale construcției sunt supuse unor solicitări speciale, care reclamă o aderență sigură a stratului de zinc, atunci trebuie procedat la o verificare a aderenței acestuia. Modul de verificare trebuie să ia în considerare eventualele solicitări viitoare de exemplu un test la solicitarea prin șoc.

Din cercetările efectuate privind influența zincării la cald asupra proprietăților mecanice ale oțelurilor destinate structurilor sudate, s-a constatat că rezistența la rupere, limita de curgere, alungirea la rupere și rezistența la oboseală nu sunt afectate decât în foarte mică măsură. La folosirea oțelurilor deformate la rece și a celor cu tendința spre îmbătrânire, trebuie luat în considerare faptul că în funcție de gradul de deformare și de compoziția chimică a oțelului, se poate ajunge la o accelerare a fenomenului de îmbătrânire după zincare la cald. S-a mai constatat că la profilele deformate la rece au apărut benzi îngroșate de zinc, în direcția forței de tracțiune.

În cazul oțelurilor durificate sau a celor cu rezistența mărită, se poate ajunge în cursul decapării sau zincării la cald, la formarea fisurilor datorită tensiunilor existente în metalul de bază.

Oțelurile cu rezistență mărită, dobândită pe baza unui tratament termic sau pe baza ecruisării, pot să-și piardă o parte din calitățile de rezistență, datorită solicitărilor termice din baia de zincare.

Neomogenități în stratul de zinc pot apărea la construcțiile zincate la cald, mai ales în zonele în care construcția a suferit tratamente termice. Ciclul termic la sudare este un astfel de tratament. Același efect se obține și dacă oțelul a fost deformat la cald sau a fost tăiat prin procedee termice.

Rugozitatea suprafeței pregătite pentru zincare la cald are de asemenea influență asupra grosimii stratului de zinc. Adâncimi mari ale asperităților așa cum apar ele după șlefuire cu corindon, duc la grosimi mai mari ale stratului de zinc.

Denivelările de pe suprafețele produse de petele de coroziune, încrețirile de laminare, arsurile sau canelurile, devin clar vizibile după zincare și pot duce, în mod similar defecte metalurgice la deteriorarea stratului de zinc.

### **2.2.2 Oțeluri acoperite prin imersare în aluminiu, staniu, plumb și aliaje**

Aluminiul se depune în grosime de 10-20 $\mu$ m, din motive tehnologice, numai pe semifabricate plane, pe piese cu geometrie variabilă, fiind dificil de depus. Protecția anticorozivă a acoperirilor prin imersare în aluminiu topit se manifestă față de medii acide și în gaze fierbinți până la 600°C. În tabelul 2.5. se prezintă comparativ comportarea generală la coroziune în atmosfera și în apă a zincului și aluminiului.

Staniul are importanță în industria alimentară, unde este utilizat ca strat acoperitor pentru tabla din oțel. Prin imersare se depune în grosime de 5-20 $\mu$ m. Prețul mai mare al staniului, de zece ori mai mare decât al zincului, îl recomandă pentru acoperiri în straturi subțiri, care pot fi depuse mai eficient prin alte procedee, cum ar fi galvanizarea.

Plumbul este un metal foarte rezistent în acid sulfuric, depunerea sa pe oțel ridică probleme tehnologice din cauza tensiunii sale superficiale, care nu permite

aplicarea directă. Rezolvarea constă în interpunerea unui strat de staniu aplicat pe tabla din oțel. Se depune pe benzi în grosime de 3-6 $\mu$ m, iar pe piese în grosime de 15-60 $\mu$ m.

Tabelul 2.5. Comportarea la coroziune atmosferică și în apă a Al și Zn [67]

Factor de influență	Zinc	Aluminiu
PH	Rezistent în dom. 7-12	Rezistent în dom. 4-8
Temperatura apei	Rezistent până la 60°C	Nu influențează, rezistent
Duritatea apei	Rezistentă bună în domeniul 4-25 grade	Nu influențează, rezistent
Ionul Cu <sup>2+</sup>	Corodează prin formarea unui element galvanic local	Corodează prin formarea unui element galvanic local
Ionul SO <sup>2-</sup>	Corodează puternic	Nu influențează, rezistent
Ionul Cl <sup>-</sup>	Corodează	Corodează
Capacitate de protecție la distanță	Foarte bună	Numai la straturile care conțin și zinc

Aliajelor Al-Zn sunt: "galvalum": 55%Al+43,5%Zn+1,5%Si și "galfan": 95%Zn+5%Al. Acestea se depun pe semifabricate din oțel. Ele înlocuiesc depunerile de zinc, având o comportare bună la coroziune atmosferică, combinând proprietățile favorabile ale ambelor metale: aluminiu are rezistență bună în medii neutre, în timp ce zincul asigură protecția anodică a suportului. Ambele aliaje se depun în prezent numai pe semifabricate: galvalum în grosime de cel puțin 14 $\mu$ m, galfan în grosime de cel puțin 7 $\mu$ m [118].

Un alt aliaj depus prin imersare este aliajul Al-Si numit "Alusi". Acesta are un conținut de 90%Al și 10% Si, care oferă o rezistență bună la oxidare la temperaturi ridicate. Prezența siliciului permite utilizarea oțelurilor acoperite cu "alusi" până la temperaturi de 650 °C sau chiar de 800°C. În contact cu oxigenul se formează instantaneu, la suprafața oțelului un strat pasivat compus din oxid de aluminiu, acest tip de strat protector oferă rezistență excelentă la coroziune chimică [118].

### 2.2.3 Oțeluri acoperite prin cadmiere electrolică

Conform seriei potențialelor electrice, cadmiul este mai puțin electronegativ decât fierul. În condiții practice de exploatare acoperirile de cadmiu, pe oțel se comporta anodic, astfel încât acestea au un efect protector apreciabil. În atmosfera Cd se pasivează cu un strat dens și aderent de oxizi și săruri bazice, care este dizolvat de mediile agresive acide. Din acest motiv se evita utilizarea sa în contact cu alimentele, cu lemnul și cu unele materialele plastice. Cadmiul formează compuși solubili cu cianurile și cu amoniacul.

Sudabilitatea cadmiului este mai bună decât cea a zincului, dar capacitatea sa de protecție anticorozivă la distanță este mai slabă. Cadmiul este un element de toxicitate puternică. În unele țări este folosit numai în cazuri excepționale, iar în altele utilizarea sa este interzisă. În acest sens, alternativele cadmierii galvanice

sunt acoperirea cu Zn, cu aliaje ale zincului, cu Cu-Ni sau cu Sn. Cadmiul are întrebuințări în prezent doar în industria aeronautică și spațială, în domeniul construcțiilor marine, în industria automobilelor și în electrotehnică. În afara de depunerea Cd pe oțel acesta se depune pe fonta cenușie și în unele cazuri speciale pe Cu și aliajele sale.

Tratamentul ulterior constă în tratamentul termic de maleabilizare, datorită pericolului fisurării la hidrogen, 2- 3 ore la temperatura de 200°C. Pentru creșterea rezistenței la coroziune, stratul din cadmiu poate fi supus cromatării, dar tratamentul chimic se va conduce cu atenție, deoarece Cd este instabil la temperaturi mai mari de 100°C, ceea ce poate duce la distrugerea sa pe o grosime de ordinul micrometrilor.

Datorită toxicității substanțelor utilizate la depunerea sa electrolitică și, mai ales, a cadmiului însuși, instalațiile de electroliza trebuie echipate cu instalații pentru depoluare, care sunt foarte scumpe făcând depunerea, în ansamblu, nerentabilă.

Tabelul 2.6. Principalii parametri de regim la cadmierea electrolitică [67]

Tipul electrolitului	Compoziția chimică a băii g/l	Temperatura băii ° C	Densitate de curent A/ dm <sup>2</sup>
Cu cianuri	CdO 20-30 NaCN 100-140 NaOH 10-15	20-35	max. 5
Cu sulfați	CdSO <sub>4</sub> 50-60 Gelatină pt luciu	20-30	max.1,5
Cu fluoborați	CdO 100 Acid fluoboric 400	20-30	1-4

#### 2.2.4 Oțeluri acoperite prin cuprare electrochimică

Cuprarea electrochimică constă în depunerea cuprului pe stratul suport prin electroliza unor soluții acide sau cu cianuri (tabelul 2.7).

Cuprul este mai electropozitiv decât hidrogenul, deci este insolubil în acizi neoxidanți reci. În acizi oxidanți, inclusiv în oxigenul atmosferic el se oxidează ușor la CuO și Cu<sub>2</sub>O, care nu produc pasivarea suprafeței sale în acizi. Utilizarea sa ca strat acoperitor se bazează pe proprietățile sale de rezistență chimică parțială, pe aspectul sau decorativ, pe electroconductibilitatea și pe ductilitatea foarte bună. În scop anticoroziv Cu se depune prin electroliza în straturi dense, fără pori, în general, ca strat intermediar de grosime 3-8μm sub straturi din Sn, Ni, Ag, sau alte metale nobile.

Tabelul 2.7. Principalii parametri de regim la cuprarea electrochimică [67]

Tipul electrolitului	Compoziția chimică a băii g/l	Temperatura băii ° C	Densitate de curent A/ dm <sup>2</sup>
Cu sulfat de cupru	CuSO <sub>4</sub> 150-200 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 50-100 Cloruri 150-200	20-50	Max. 7
Cu fluoborat	Max. 120 substanțe pt luciu	25-50	Max.40
Cu fosfat	50	50-70	Max. 8
Cu cianuri	Cu 20-60 CN <sup>-</sup> 20-40	40-75	Max. 8

În timpul galvanizării se recomandă alternarea repetată a polarității, de ex., 20 s piesa e conectată la catod, apoi 3s este conectată la anod, fapt care are efecte pozitive asupra proprietăților stratului depus: luciu, rugozitate, dispersie, uniformitate a grosimii, porozitate și ductilitate. Pe durata scurtă a conectării piesei la anod, stratul de cupru depus anterior suferă o dizolvare anodică limitată, cu efect de lustruire electrochimică. Procesul cuprării este deranjat de impuritățile din baie: substanțe organice și carbonați în exces, ionii metalelor grele. Primii se evacuează prin filtrare cu carbon activ, iar metalele grele se îndepărtează electrochimic.

### 2.2.5 Oțeluri acoperit prin nichelare electrochimică

Nichelarea electrochimică constă în acoperirea oțelului cu nichel prin electroliza soluțiilor acide (tabelul 2.8). Creșterea concentrației substanțelor organice determină creșterea tensiunilor interne în stratul de nichel depus. Straturile din Ni sunt mai puțin tensionate pentru că electroliții de depunere nu conțin substanțe organice, nu conțin carbon, dar au un conținut limitat de sulf, mai mic de 0,002%.

Nichelul este practic rezistent chimic în soluții alcaline și slab alcaline. Pentru că acesta este mai electropozitiv decât majoritatea metalelor, depunerile de Ni sunt de tip catodic și nu protejează suportul împotriva coroziunii. Din acest motiv straturile de Ni trebuie să fie cât mai dense posibil. În scopul depunerii unei acoperiri din Ni fără pori se recurge la sistemul duplex: întâi se depune un strat mat apoi unul lucios. Astfel probabilitatea formării porilor care să traverseze acoperirea este minimă. În plus stratul lucios, mai electropozitiv datorită conținutului său mare în substanțe anorganice protejează catodic împotriva coroziunii stratului mat, care este mai electronegativ.

Tabelul 2.8. Principalii parametri de regim la nichelarea electrochimică [67]

Tipul electrolitului	Compoziția chimică a băii g/l	Temperatura băii ° C	Densitate de curent A/ dm <sup>2</sup>
Cu sulfat	Sulfat de Ni max. 300 Clorură de nichel max. 50 Acid boric max. 40	40-70	3-10
Cu sulfamat	Sulfamat de Ni 350-450 Clorură de Ni max. 10 Acid boric 30-40	30-50	20
Cu fluoborat	Fluoborat de Ni 300-450 Acid fluoboric max. 40 Acid boric 30-40	40-80	Max. 10

Depunerile galvanice de Ni posedă o mare ductilitate și se pot lustrui ușor. În general straturile de Ni depuse electrochimic în scopuri anticorozive au o grosime de 7-10 μm. În industria optică se folosesc straturi de Ni cu grosimea de 2-3 μm, iar pentru reparații se depun straturi de Ni cu grosimea de 200-3000 μm.

Nichelul face parte dintre materialele cancerigene. În secțiunile de galvanizare el se afla în atmosfera sub formă de praf și de aerosoli. Din acest motiv exhaustarea și evitarea formării prafului sunt obligatorii.

### 2.2.6 Oțeluri acoperite prin cromare electrochimică

Cromarea electrochimică constă în depunerea cromului pe materialul suport prin electroliză cu anod insolubil din plumb a unor soluții de săruri de  $\text{Cr}^{6+}$ . Parametrii de regim la cromarea electrochimică sunt prezentați în tabelul 2.9.

Deși metal electronegativ, cromul posedă proprietatea de a se pasiva, astfel încât comportarea sa în medii corozive este comparabilă cu cea a metalelor termodinamic stabile. Acoperirile din Cr prezintă pori. Din acest motiv la grosimi mai mici de 20 μm efectul lor protector pe metale corodabile nu numai că este nul, dar cromul suferă coroziunea în puncte. Pelicula pasivată de oxid de crom este subțire și invizibilă până la temperatura de 300°C, după care culoarea se închide treptat cu creșterea temperaturii. Pelicula, având proprietăți chimice foarte bune, nu rezistă totuși în acid sulfuric fierbinte concentrat și în prezența ionilor de halogenuri.



Tabelul 2.9. Principalii parametri de regim la cromarea electrolică [67]

Tipul electrolitului	Compoziția chimică a băii g/l	Temperatura băii ° C	Densitate de curent A/ dm <sup>2</sup>
Cromare lucioasă	Acid cromic 300-400 Acid sulfuric 3,5-4	Max. 60	10-20
Cromare dură	Acid cromic 150-450 Acid sulfuric 0,3-1 Acid fluoro-siliciu 0,3-3	20-25	5
Electroliți cu autoreglare	Acid cromic 300 Sulfat de Sr 1-3,5 Fluorosilicat de K 2,5-4,5 Bicromat de K 5-10	30-45	8-15

Contrar proprietăților de plasticitate bune ale stratului de crom depus prin imersare în topitură, stratul depus electrochimic are o duritate ridicată, pe seama structurii sale extrem de fină. Straturile depuse prin cromare dură se fisurează și se exfoliază la solicitări mecanice. Duritatea poate fi influențată de parametri regimului electrolic. În timpul galvanizării se dezvoltă hidrogen, care rămâne în stratul de Cr prins sub forma de incluziuni. Printr-un tratament termic ulterior acesta se volatilizează. La temperaturi peste 350°C structura stratului de crom suferă o recristalizare, având ca efect micșorarea durității sale. Datorită durității mari, rezistența la uzură a acoperirilor din Cr este mare în prezența unui coeficient de frecare foarte mic.

O altă proprietate care face din crom un metal cu o comportare excepțională este capacitatea mică de umectarea suprafeței sale, ceea ce împiedică fixarea mediilor agresive lichide pe straturile din Cr. Frânând coroziunea se împiedică utilizarea eficientă a lubrifierii pieselor cromate.

Cromul se depune prin electroliza pe oțeluri nealiate și aliate. Cromul se depune prin electroliza cu anod insolubil, din plumb, a unor soluții de săruri de Cr<sup>6+</sup>.

### 2.2.7 Oțeluri acoperite prin zincare electrolică

Această metodă de depunere este cea mai larg folosită pentru realizarea straturilor protectoare metalice și constă în electroliza soluțiilor apoase de săruri ale metalului respectiv.

Calitatea depunerii depinde de gradul de pregătire a suprafeței destinată acoperirii și de condițiile de electroliză: compoziția băii, natura electrozilor, densitatea medie de curent, temperatura, agitarea soluției.

Temperatura băii se limitează obligatoriu la 30° C. Cauzele perturbării procesului constau, în general în întârzierea înprospătării dozării, mai ales cu substanțe care conferă luciu, prezența ionilor metalici străini și nerespectarea rețetei băii.

Piesa de acoperit se leagă la catodul unei surse de curent continuu. Anodul poate fi confecționat din metalul care se depune, cum este și cazul zincării.

Acoperirile metalice obținute prin electroliză aderă bine la suprafața metalului, sunt de puritate mare și uniforme ca grosime. Acoperirea se realizează într-un singur strat, dar se poate realiza și în straturi succesive.

Zincul se depune în grosime de 5-15 $\mu$ m pe piese care funcționează în spații interioare și 15-25 $\mu$ m pentru piese care funcționează în spații exterioare. Un defect care poate apărea în straturile din zinc este formarea unei structuri cristaline aciculare, care se exfoliază ușor. Remediul recomandat este tratament termic de maleabilizare 30 min. la 200°C.

Tratamentul ulterior galvanizării constă în îmbunătățirea proprietăților anticorozive de zinc prin:

- lubrifiere cu ulei sau grăsime într-un solvent organic;
- cromatare

Cromatarea presupune imersarea piesei în soluție acidă. Astfel se depune un strat cu grosimea de 1-5 $\mu$ m cu conținut de Cr și Zn. Acesta devine instabil la temperatura de 70-80° C, fapt pentru care se recomandă acoperirea sa cu substanțe de protecție anticorozivă temporară. O rezistență chimică a stratului de zinc la o temperatură de max. 4 ori mai mare se poate obține dacă stratul de Zn este apoi acoperit cu un polimer prin imersarea piesei într-o dispersie apoasă.

Zincul este un metal necesar organismului uman în cantitate de 15mg/zi, dar are asupra mediului un efect poluant. De aceea procentul de zinc se limitează la max. 2mg/l în apele reziduale. Apele și reziduurile solide mai conțin, substanțe cu grad mare de toxicitate, care se neutralizează prin tratare cu agenți oxidanți, apă oxigenată. Cromatii se reduc la Cr<sup>3+</sup> prin tratare cu sulfat de Fe<sup>2+</sup>, sau cu biosulfura de Na. Cromatul de zinc este catalogat ca substanța cancerigenă. Băile de cromatare, în care se formează cromatul de zinc trebuie prevăzute cu instalațiile exhaustoare pentru evacuarea aerosolilor.

Acoperirile de zinc sunt destinate protejării oțelului în contact cu aerul umed, cu atmosferă poluată cu gaze de ardere sau în contact cu produsele petroliere.

Acoperirile electrozincate sunt produse continuu, trecând materialul de bază printr-o baie de electrodepunere. Un flux tehnologic de electrozincare se compune din trei secțiuni: intrare, parte centrală în care se pregătește și se acoperă suprafața și ieșire. În figura 2.7 este redat fluxul tehnologic la o acoperire prin electrogalvanizare.

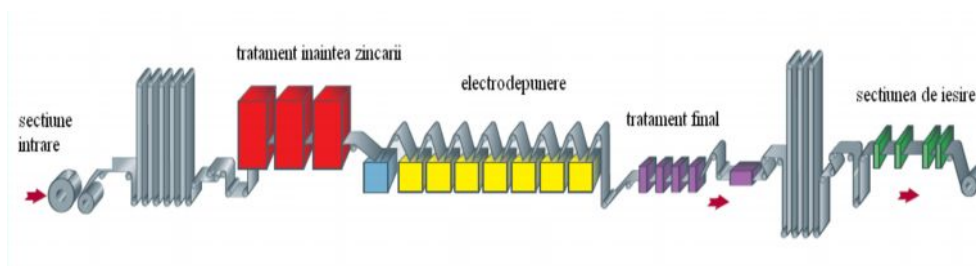


Fig. 2.7. Etapele galvanizării [40]

Fluxul tehnologic folosit la elaborarea primelor probe în vederea efectuării experimentărilor s-a efectuat la firma Westmetal SRL Timișoara și a constat din:

- degresare chimică, timp de 5-15 min, la temperatura de 60-80°C, folosind un degresant universal, silicați, + aditivi, carbonați, fosfați;
- spălare dublă în cascadă;
- decapare în soluție de acid clorhidric (HCl), timp de 20-50 min;
- degresare electrochimică în soluție alcalină formată din hidroxid de sodiu sau potasiu, săruri cu caracter anionic și cationic și aditivi de umectare. Această degresare s-a efectuat la o densitate de curent  $j=6-15A/dm^2$ , la temperatura de 30-50°C, timp de 30s-2min;
  - activare în soluție de acid clorhidric sau acid sulfuric, la temperatura mediului de 16-24°C, timp de 10-30s;
  - zincarea propriu-zisă folosind un mediu pe bază de cloruri cum ar fi: potasiu 200-250g/l, zinc 65-75g/l, acid boric 22-28g/l, agenți de luciu (derivați alcoolici). Parametri de zincare sunt prezentați în tabelul 2.10.

Tabelul 2.10 Parametri de zincare

Temperatura mediu °C	Densitate de curent A/dm <sup>2</sup>	Viteza de depunere μm/min	Timp min	Grosime μm
20-25	2,5	0,6-0,8	15	8
20-25	2,5	0,6-0,8	22	15

- tratament final de pasivare – variante. Astfel s-au făcut două tipuri de pasivări: una cu rol estetic și cealaltă pentru mărirea rezistenței la coroziune cu Cr<sup>3+</sup> sau Cr<sup>6+</sup>, la temperaturi de 40-60°C, timp de 1-5 min. Astfel au fost obținute 2 variante de pasivare: „albă” la folosirea Cr<sup>3+</sup> și „galbenă” la folosirea Cr<sup>6+</sup>;
  - uscare la 70°C cu aer cald, timp de uscare 10min
  - inspecție vizuală după fiecare etapă, cu urmărirea asigurării continuității filmului de apă recirculată, respectiv cu urmărirea marginilor, în scopul evidențierii existenței sau absenței arsurilor. Măsurarea grosimii stratului de zinc este parte componentă din controlul final la elaborarea tablelor galvanizate. S-au constatat grosimi mai mari ale stratului de zinc în părțile laterale ale băii de galvanizare și mai mici în centru, datorită densității de curent diferită în baia de zincare.

### 2.3 Domenii de aplicabilitate

Materialul metalic cel mai utilizat pentru protecția oțelului împotriva coroziunii este zincul. Astfel în toate sectoarele industriale ponderea cea mai însemnată o au oțelurile acoperite cu zinc:

- 62% oțeluri acoperite, cu zinc sau aliaje de zinc, prin imersare;
- 25% oțeluri acoperite cu zinc prin galvanizare;
- 13% pentru celelalte tipuri de acoperiri [120].

În domeniul construcției automobilelor folosirea oțelurilor acoperite a înregistrat o creștere semnificativă în ultimul deceniu ajungând între 50% și 70%-80% din întreaga gama de oțeluri utilizate în acest domeniu. Ponderea cea mai însemnată o au oțelurile acoperite cu zinc prin galvanizare:

- 55% oțeluri acoperite cu zinc prin galvanizare;
- 38% oțeluri acoperite prin imersare la cald;
- 7% oțeluri acoperite cu aluminiu.

Cel mai utilizat domeniu de aplicabilitate al zincului este cel destinat acoperirilor galvanice. Din figura 2.9 respectiv 2.10 se observă că din totalul producției de zinc în anul 2004, 47% s-a folosit în domeniul acoperirilor galvanice, iar în anul 2008 pentru același domeniu este folosit 50% din producția mondială.

Domeniul prioritar în care este utilizat oțelul acoperit cu zinc este cel al construcțiilor inclusiv cele din domeniul autoturismelor datorită protecției anticorozive a acestor materiale (fig. 2.11).

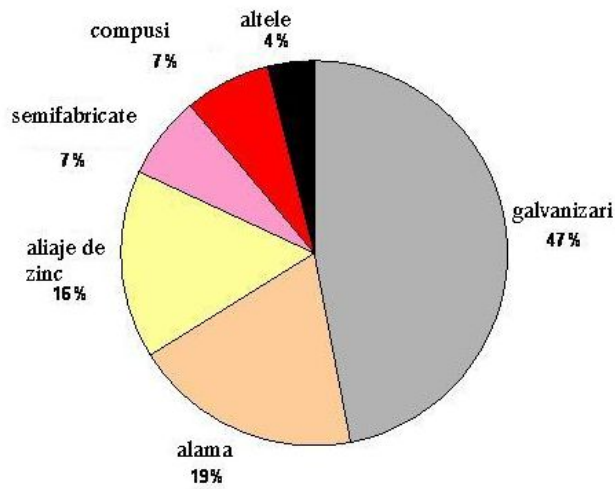


Fig.2.9 Domeniile de utilizare a zincului la nivelul anului 2004 [120]

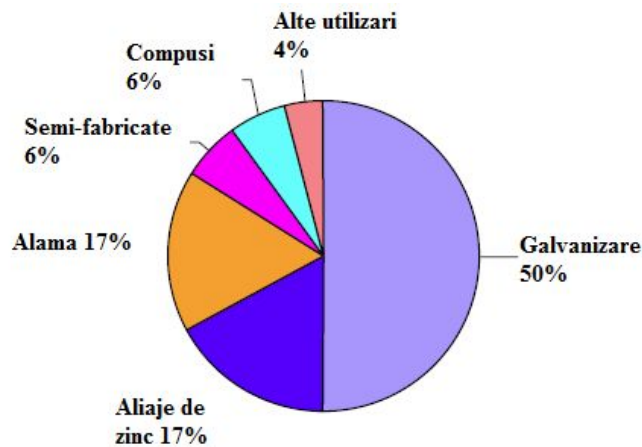


Fig. 2.10 Domeniile de utilizare a zincului la nivelul anului 2008 [119]

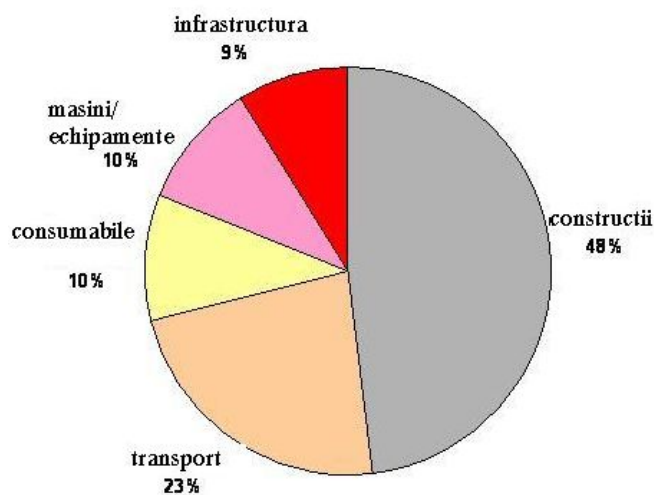


Fig.2.11 Domeniile de utilizare a oțelurilor acoperite cu zinc [119]

Conform statisticilor consumul global de zinc rafinat este în anul 2008 de 11.488.000t cu 1,6% mai mare comparativ cu 11.309.000t în 2007. Producția de zinc rafinat crește cu 2,8% de la 11.356.000t în 2007 la 11.683.000t în 2008. Producția globală de zinc extras din mină crește de la 11.129.000t în 2007 la 11.755.000t în 2008 (fig. 2.12)

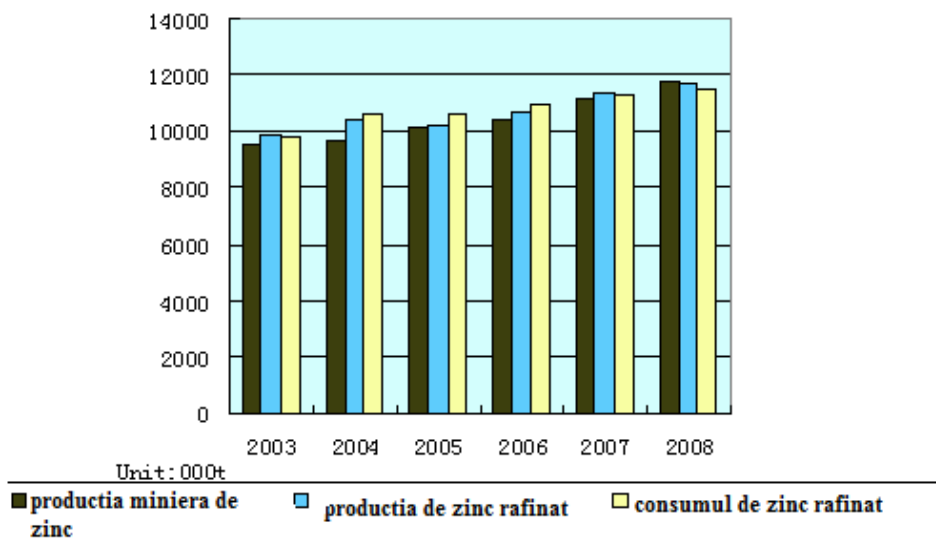


Fig. 2.12 Producția și consumul de zinc la nivel mondial [119]

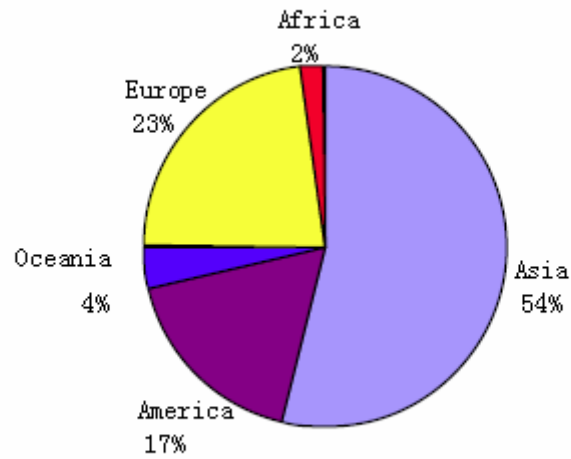


Fig. 2.13 Producția mondială de zinc pe regiuni [119]

Asia, Europa și America sunt regiunile principale în care este produs zincul, reprezentând 54%, 23% și 17 % din producția mondială de zinc (fig. 2.13). În Asia cele mai importante producătoare de zinc sunt China și India.

## 3. SUDAREA/ÎMBINAREA OȚELURILOR ACOPERITE

### 3.1. Sudarea oțelurilor acoperite

#### 3.1.1 Particularități la sudarea prin topire a oțelurilor acoperite

Cele mai utilizate oțeluri acoperite sunt cele acoperite cu zinc sau aliaje ale zincului, motiv pentru care se insistă în continuare la aspecte referitoare la îmbinarea lor.

Zincul se depune în straturi, având o grosime de 5-15 $\mu$ m, pe piese care funcționează în spații interioare și 15-25 $\mu$ m pentru piese care funcționează în exterior. Un defect, care poate apărea în straturile din zinc, constă în formarea unei structuri cristaline aciculare, care se exfoliază ușor. Remediul constă în aplicarea unui tratament termic de maleabilizare, timp de 30 min. la 200°C.

Tratamentul ulterior galvanizării constă în îmbunătățirea proprietăților anticorozive prin:

- lubrifiere în ulei sau într-un solvent organic
- cromatare.

În tabelul 3.1 se prezintă comparativ proprietățile zincului și oțelului. Se observă că conductibilitatea electrică și termică a zincului este mai mare decât cea a oțelului, în schimb temperatura de topire și de evaporare a zincului este de aproximativ 3 ori mai mică decât cea a oțelului.

În timpul sudării, stratul acoperitor de zinc este distrus pe o zona mai mică sau mai mare, funcție de procedeul de sudare utilizat, dar și de modul operator. De asemenea pentru a garanta rezistența unei îmbinări sudate, trebuie luate în considerare suflurile de zinc care pot rămâne în îmbinarea sudată [39].

Tabelul. 3.1. Proprietăți ale zincului și oțelului

Material/proprietăți	zinc	oțel
Conductibilitate electrica [m/mm <sup>2</sup> ]	16,9	9,3
Conductibilitate termica [J/cm s°C]	1,13	0,5
Temperatura de topire [°C]	419	1410
Temperatura de fierbere [°C]	907	2500
Căldura specifica [J/g°C]	0,38	0,46
Căldura de topire [J/g]	105	255

Principala problemă întâlnită la sudarea prin topire a oțelurilor acoperite cu zinc este formarea vaporilor de zinc la o temperatură de 906°C, temperatura de

evaporare a zincului, față de temperatura de topire a oțelurilor care este de aproximativ 1400 - 1500°C.

Acești vapori perturbă protecția gazoasă a arcului electric la procedeele de sudare în mediu de gaz protector ceea ce conduce la creșterea porozității. Totodată îngreunează transferul metalului de adaos.

Vapori de zinc pot rămâne în îmbinarea sudată în timpul solidificării băii metalice și contribuie la formarea suflurilor izolate sau vermiculare. Cantitatea de pori din îmbinarea sudată depinde de viteza de solidificare a îmbinării sudate și de viteza de sudare precum și de raportul dintre grosimea stratului acoperitor și grosimea substratului.

În figura 3.1. este prezentat cazul sudării a două table acoperite cu zinc prin procedee de sudare prin topire. Din figură se poate observa că zincul se va evapora de pe suprafața tablei datorită diferenței de temperatură dintre cele două materiale.

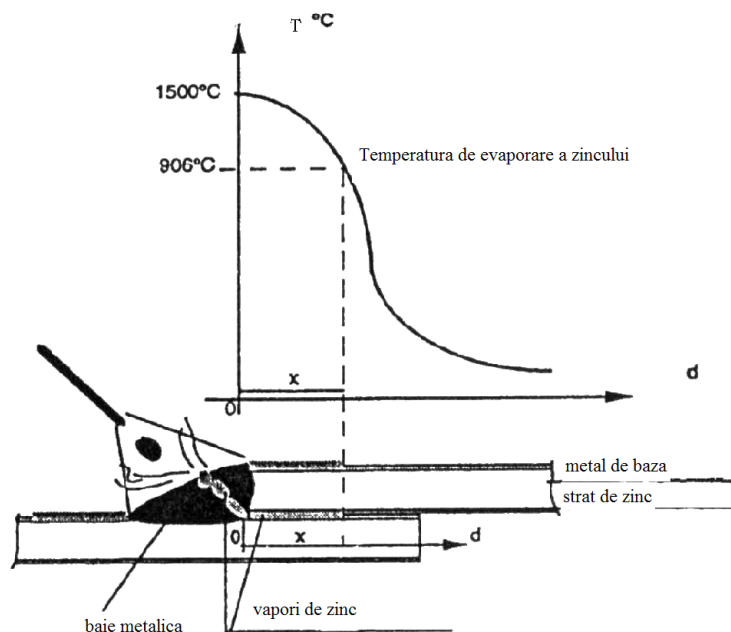


Fig. 3.1. Principiul sudării tablelor acoperite cu zinc [39]

Grosimea stratului de zinc în cazul zincării la cald variază între limite de 50-150 $\mu$ m. În cazul unei zincări la cald neîngrijite, stratul de zinc este neuniform repartizat pe suprafață, putând ajunge la valori de 200 $\mu$ m sau chiar mai mult, când apar insule cu supraînălțări de zinc.

Zincarea la cald, cu o răcire rapidă ulterioară asigură stabilitatea la coroziune și rezistența la oboseală a metalului de bază.

Tablele zincate prin procedeul electrochimic, al căror strat de zinc nu depășește grosimea de 25 $\mu$ m, pot fi sudate cu arcul electric fără dificultate, fără pregătiri speciale a suprafețelor de sudat.

În cazul sudării tablelor zincate la cald, la care stratul de zinc depășește cu mult grosimea de 25 $\mu$ m, apare riscul formării porilor în sudură din cauza că vaporii de zinc nu se pot degaja în întregime din baia metalică.

Datorită temperaturii scăzute de evaporare, 906°C, zincul de pe suprafețele acoperite, în procesul de sudare se va evapora. Vaporii de zinc ajung în baia de



sudură și în condițiile unei energii liniare de sudare mici utilizată la sudarea tablelor subțiri, sub 3mm, conduc la formarea porilor și a fisurilor intercristaline în sudură.

Condițiile de sudare cu arcul electric a tablelor zincate sunt aceleași ca și în cazul sudării tablelor nezincate, cu excepția vitezei de sudare care trebuie să fie mai mică. Micșorarea vitezei de sudare este necesară pentru a evita apariția porilor în sudură. Gradul de micșorare a vitezei este funcție de grosimea stratului de zinc, tipul îmbinării și poziția de sudare după cum urmează:

- viteza de sudare se va reduce cu atât mai mult cu cât grosimea stratului de zinc este mai mare;
- tipul îmbinării sudate trebuie ales astfel încât participarea zincului de pe suprafețele rostului de sudură să fie minimă. În caz contrar, viteza de sudare trebuie să se reducă pentru a da posibilitatea arderii zincului în fața arcului electric;
- poziția de sudare verticală descendentă favorizează arderea zincului de pe suprafețele rostului și dă posibilitatea evacuării gazelor din baia metalică.

În concluzie pentru a evita formarea porilor în îmbinarea sudată se vor respecta următoarele:

- sudarea cu viteză mai mică pentru a permite vaporilor de zinc să se evaporeze din îmbinarea sudată. Aceasta soluție nu este întotdeauna oportună în practică datorită tensiunilor care apar la sudare;
- diminuarea tensiunii arcului. Dacă tensiunea arcului este mare, lățimea sudurii este mare și zona în care este deteriorat stratul de zinc este mai mare. Tensiune arcului mică și energie liniară mică se poate folosi la sudarea oțelurilor de grosimi mici și mai puțin la sudarea oțelurilor cu grosimi mari;
- modificarea temperaturii de evaporare a zincului și crearea unui compus pe baza de zinc. Se poate depune un strat intermetalic, fosfura de fier pe stratul de zinc din zona îmbinării sudate. Acesta formează cu zincul un alt compus metalic care are temperatura de evaporare mai mare decât a zincului. Această metodă nu este de preferat datorită producerii unor gaze toxice.
- optimizarea grosimii stratului de zinc pentru ca după sudare să se asigure o protecție corespunzătoare contra coroziunii;
- utilizarea sârmelor tubulare sau a sârmelor pline conținând un mare procent de elemente dezoxidante, pentru reducerea oxidului de zinc, diminuarea vâscozității băii deoarece oxidul de zinc format la suprafața băii are influența asupra tensiunilor superficiale;
- utilizarea lipirii tari sau sudobrazării. Știind că la originea producerii vaporilor de zinc stă diferența dintre temperatura de topire a oțelului și temperatura de evaporare a zincului s-a ajuns la concluzia utilizării unui material de adaos care are temperatura de topire apropiată de temperatura de evaporare a zincului. Recomandabil este un material de adaos pe bază de cupru și îmbinarea prin sudobrazarea MIG/MAG [39].

### **3.1.2 Procedee de sudare a oțelurilor acoperite**

#### ***3.1.2.1 Sudarea cu flacăra oxiacetilenică a oțelurilor acoperite***

Tablele galvanizate se pot suda folosind ca material de adaos oțel acoperit cu cupru. Scopul este de a deteriora cât mai puțin stratul acoperitor și din această

cauză se recomandă să nu se penduleze arzătorul în timpul sudării. Este recomandat să se sudeze de la stânga la dreapta.

De asemenea se poate utiliza un material de adaos format din 60%Cu și 40% Zn, care se topește la o temperatură de 900-930°C. Folosind acest material stratul de zinc rămâne practic intact.

Recomandările tehnologice pentru acest procedeu sunt următoarele:

- utilizarea unei duze de gaz mai mici decât pentru sudarea oțelurilor neacoperite de aceeași grosime;
- utilizarea unei flăcări cu caracter oxidant;
- sudarea de la stânga la dreapta și evitarea pendulării arzătorului în lateral.

În tabelul 3.2 se prezintă recomandări tehnologice privind sudarea cu flacără oxiacetilenică folosind ca material de adaos aliajul CuZn.

Tabelul 3.2 Recomandări tehnologice la sudarea cu flacără oxiacetilenică a oțelurilor galvanizate [39]

Grosime tablei s mm	Pregătirea rostului	Deschiderea rostului
Max. 3,2	Rost I	s/2
3,2-6,4	Rost V cu unghiul între 70-90°	s/4

### 3.1.2.2 Sudarea manuala cu electrozi înveliți a oțelurilor acoperite

#### Îmbinare cap la cap

La sudare cap la cap a oțelurilor acoperite se reduce pătrunderea și se alege deschiderea rostului mai mare. La o grosime de 3mm deschiderea rostului în cazul sudării oțelurilor galvanizate este de 2mm în loc de 1,5mm. Electrocul execută mișcări laterale pentru a se arde zincul de pe suprafața îmbinării, evitându-se astfel defectele de tipul suflurilor. Totodată se reduce viteza de sudare cu 20-30%, față de sudarea oțelurilor neacoperite.

Pentru a obține o pătrundere completa se poate folosi o deschidere a rostului similara cu cea de la oțelurile obișnuite, dar trebuie respectate câteva indicații:

- reducerea unghiului dintre electrod și tabla la 30° în loc de 70° cât este de obicei;
- oscilarea electrodului și reducerea vitezei de sudare cu 40%.

În tabelul 3.3. se prezintă recomandări tehnologice pentru sudarea manuală cu electrozi înveliți pentru table acoperite cu grosimea de 3mm.

Tabelul 3.3 Recomandări tehnologice la sudarea manuală cu electrozi înveliți a oțelurilor acoperite pentru table de 3mm grosime [39]

Tipul învelișului electrodului	Diametrul electrodului mm	Deschiderea rostului mm	Curentul de sudare A
Rutilic	3,2	2	117-127
Bazic	3,2	2	110-117

*Îmbinare în colț*

Parametrii tehnologici pentru realizarea cu electrozi înveliți bazici a îmbinărilor în colț a oțelurilor galvanizate sau cele obținute prin imersare la cald sunt date în tabelul 3.4.

Tabelul 3. 4 Alegerea curentului de sudare la îmbinările în colț [39]

Grosimea tablei mm	Diametrul electrodului mm	Curentul de sudare A
6	3,2	110-130
12	4	140-170

În unele cazuri, la oțelurile obținute prin imersare la cald, grosimea stratului de zinc este mai mare decât în cazul oțelurilor galvanizate și de asemenea este neuniformă. Din aceasta cauză excesul de zinc poate crea probleme la sudarea în poziție verticală deoarece zincul lichid se poate scurge înaintea băii de sudare și rezulta o zgura dificil de controlat.

Pentru a preîntâmpina acest aspect se recomandă menținerea unui arc cât mai scurt posibil.

Un defect important care se întâlnește la sudarea oțelurilor galvanizate este formarea de cratere datorită fluidității excesive a băii metalice (funcție de tipul electrodului utilizat) și funcție de procedeul de sudare. Acest defect se produce în general la sudarea în poziție verticală și se poate evita în două moduri:

- în timpul execuției stratului de rădăcina, electrodul se ține la 90° în axa îmbinării și se balansează în sus și jos circa 8mm, după aceasta se efectuează al doilea strat executându-se o mișcare triunghiulară;
- stratul de rădăcina se execută menținându-se electrodul la 70°, după care se execută stratul al doilea cu o mișcare zig-zag.

Se poate aprecia că la sudarea cap la cap a oțelurilor galvanizate efectuată cu electrozi rutilici și bazici prezența porilor este redusă. În cazul sudurii în colț se observă pori mai ales la sudarea oțelurilor groase, peste 3mm grosime.

Pentru sudarea oțelurilor galvanizate se pot folosi electrozii înveliți de cupru-aluminiu sau cupru - plumb. Temperatura lor de topire trebuie să fie mai redusă între 1000-1050°C pentru a reduce cantitatea de zinc evaporată. În plus îmbinarea sudată prezintă o bună rezistență la coroziune și proprietățile mecanice sunt similare cu cele a metalului de bază.

Alte tipuri de electrozi folosiți sunt electrozii înveliți din oțel inoxidabil.

**3.1.2.3 Sudarea WIG a oțelurilor acoperite**

La sudarea WIG a oțelurilor acoperite se reduce cantitatea de zinc volatilizată. Un dezavantaj este faptul că extremitatea electrodului de wolfram se încarcă rapid cu zinc și se deteriorează repede. Din această cauză se recomandă ca unghiul de înclinare a electrodului de wolfram față de orizontală să fie de 70° precum și utilizarea unei duze de gaz cu diametru crescut, pentru a diminua deteriorarea electrodului. Se mărește și debitul gazului de protecție de la 7l/min la 12l/min, pentru a îndepărta vaporii de zinc și se folosește un arc lung pentru reducerea pătrunderii sudurii.

Amorsarea arcului electric prin înaltă frecvență este recomandată în locul folosirii amorsării lift-arc.

Procedeele de sudare WIG permite și folosirea la sudarea oțelurilor zincate materiale de adaos din cupru și aluminiu sau cupru și siliciu.

În tabelul 3.5 sunt prezentate recomandările tehnologice privind parametri de sudare, utilizând un material de adaos de tipul SG-CuSi3, gazul de protecție argon, în condițiile în care debitul folosit este de 12 l/min, pentru patru variante de grosimi de tablă [39].

Tabelul 3.5 Parametrii utilizați sudarea WIG a tablelor galvanizate [39]

Grosimea tablei mm	1	1,5	2	3
Curentul de puls A	80	100	110	120
Curentul de bază A	38	50	55	60
Frecvența pulsului Hz	2,5-3	2,5-3	2,5-3	2,5-3
Viteza de avans a sârmei m/min	4	4,5	8,5	11
Viteza de sudare cm/min	50-70	50-70	50-70	50-70

### **3.1.2.4 Sudarea MIG/MAG a oțelurilor acoperite**

Prin acest procedeu de sudare se obține o productivitate mai ridicată, comparativ cu celelalte procedee de sudare cu arc electric. Acest procedeu este des utilizat în industria automobilelor pentru asamblarea componentelor din table galvanizate, de grosimi mici.

Pătrunderea la sudarea MIG a oțelurilor galvanizate este mai mică în comparație cu sudarea MIG a oțelurilor neacoperite.

Principalele probleme, care apar la sudarea oțelurilor acoperite sunt următoarele:

- stropirea ;
- porozitatea excesivă, mai ales la sudurile în colț;
- distrugerea stratului de zinc pe o zonă mai mare, comparativ cu celelalte procedee de sudare;
- degajarea gazelor;
- fisurarea datorită zincului lichid.

Datorită pierderilor mari de material, cauzate de stropirea intensă, gazul de protecție joacă un rol important la sudarea acestor materiale. S-a constatat că gazul de protecție cel mai indicat este CORGON 18 și modul de transfer este prin scurtcircuit.

Reducerea porilor este o problemă majoră, mai ales la sudurile în colț. Pentru a diminua porii, s-au încercat mai multe variante tehnologice. O variantă tehnologică se referă la deschiderea rostului de sudare, la cel puțin 1,5mm .

În compoziția sârmelor pentru sudarea MIG a oțelurilor galvanizate se recomandă un conținut mare de mangan, sârme aliate cu Ni-Cu, sârme cu conținut scăzut de siliciu și cu conținut ridicat de titan. Alți cercetători recomandă sârme cu conținut ridicat de mangan și siliciu, care dau rezultate bune la sudarea MAG pulsant, chiar dacă se diminuează vâscozitatea băii. De asemenea rezultate bune se obțin folosind sârme cu un conținut ridicat în elemente dezoxidante, Al, Ti, Zr.

Unele încercări realizate în construcția de automobile, au demonstrat că sârmele tubulare clasice asigură proprietăți mai scăzute în raport cu sârmele pline deoarece arcul electric este foarte instabil.

Noua generație de sârme tubulare, fără zgură, sunt utilizate la sudarea manuală sau mecanizată a tablelor galvanizate subțiri. Aceste tipuri de sârme tubulare reduc stropirile, aspectul sudurii este estetic și de asemenea diminuează lățimea stratului distrus în timpul procesului de sudare. Respectivul tipuri de sârme conțin un procentaj scăzut de aluminiu și titan, care calmează și fluidizează baia metalică și ușurează degajarea gazelor.

Echipamentul de sudare utilizat trebuie să permită sudarea cu tensiuni mici ale arcului, aproximativ 9,5-10V la o sârma cu un diametru de 1mm, comparativ cu 20-26V, pentru sudarea MAG tradițională. Gazul utilizat trebuie să fie un amestec de argon, CO<sub>2</sub> și O<sub>2</sub> [40].

În tabelul 3.6 sunt prezentați parametri recomandați pentru sudarea prin procedeul MIG a oțelurilor acoperite. Gazul de protecție utilizat este argon cu debitul de 12 l/min, diametrul sârmei de sudare este de 1mm, iar viteza de sudare este 50-70 cm/min.

Tabelul 3.6 Parametri de sudare a tablelor galvanizate pentru procedeul MIG/MAG [39]

Grosime mm	1	1,5	2	3
Tensiunea arcului V	14	14,3	14,5	17
Curentul de sudare A	55	72	90	118
Viteza de avans a sârmei m/min	2,3	3,4	4,5	6

Parametrii de sudare la îmbinarea oțelurilor galvanizate sunt mai greu de stabilit decât la sudarea oțelurilor obișnuite. Alegerea parametrilor de puls corespunzător este indispensabil pentru a realiza o îmbinare de calitate. În tabelul 3.7. sunt dați comparativ parametri de sudare în curent pulsant pentru table acoperite și pentru table neacoperite.

Tabelul 3.7 Parametri de sudare MIG/MAG în curent pulsant pentru table acoperite și pentru table neacoperite [25]

Grosimea tablei mm	0,7	0,7	2,5	2,5
Starea suprafeței	neacoperită	acoperită	neacoperită	acoperită
Tipul curentului	pulsat	pulsat	pulsat	pulsat
Polaritatea curentului	CC <sup>+</sup>	CC <sup>+</sup>	CC <sup>+</sup>	CC <sup>+</sup>
Gazul de protecție	Ar+5%O <sub>2</sub>	Ar+2,5%CO <sub>2</sub>	Ar+18% CO <sub>2</sub>	Ar+2,5%CO <sub>2</sub>
Marca sârmei	G2Si	CuSn1	G2Si	CuSn1
Diametrul sârmei mm	0.8	0.8	1	1
Viteză de sudare cm/min	70	80	80	80
Viteza de avans a sârmei cm/min	375	550	600	750
Tensiunea arcului V	19	28.5	28	25
Curentul de sudare A	60	65	160	165

### 3.1.2.5 Sudarea cu fascicul laser a oțelurilor acoperite

La sudarea oțelurilor acoperite cu fascicul laser se recomandă folosirea un laser Nd:YAG cu fascicul pulsant la o putere de cel puțin 250W sau un laser cu fascicul continuu la o putere de 2KW. Utilizând un laser continuu la o putere de 1600W, o bună calitate a îmbinării sudate se obține până la o viteză de 60mm/s. Prin comparație viteza maximă acceptabilă când se utilizează un laser pulsant la o putere de 250W este de 2,4 mm/s [94].

În industria autoturismelor se utilizează tot mai frecvent oțeluri acoperite pentru caroserii, pentru a crește rezistența la coroziune a acestora. Sudarea cu fascicul laser este o alternativă la îmbinarea acestor tipuri de materiale comparativ cu procedeele tradiționale de sudare, deoarece oferă o serie de avantaje față de celelalte procedee, în special sudarea prin presiune în puncte. De exemplu suprapunerea tablelor este mai redusă la sudarea cu fascicul laser rezultând astfel o reducere semnificativă în greutatea a caroseriilor pentru autoturisme. Totodată nu se realizează contactul direct între scula de sudare și piesă și accesul la sudare poate fi numai dintr-o singură parte. Un alt avantaj al utilizării fascicului laser la sudare este aceea că acesta poate fi transmis prin fibră optică și poate fi ușor integrat la sudarea robotizată.

Sudarea cu fascicul laser a oțelurilor acoperite cu zinc prin suprapunere este ilustrată în figura 3.2. Problemele care apar la sudarea acestor oțeluri prin suprapunere sunt legate de temperatura scăzută de fierbere a zincului comparativ cu temperatura de topire a oțelului. Atunci când se sudează prin suprapunere tablele acoperite pe ambele suprafețe zincul de la interfața dintre table se evaporă și rămâne prin îmbinarea sudată la interfața dintre materiale. Fără a utiliza un interstițiu între table acești vapori nu se pot elimina decât în baia metalică și ca efect rezultă o îmbinare sudată cu o porozitate excesivă.

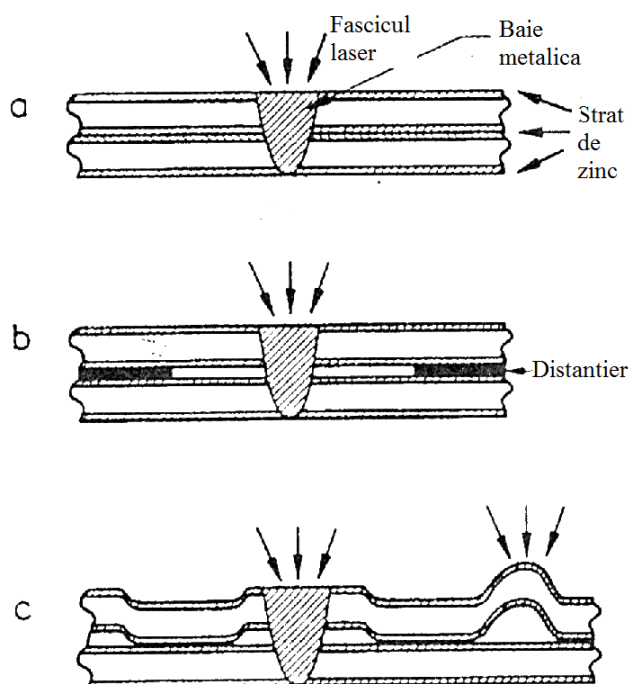


Fig 4.2. Geometria rostului la sudarea oțelurilor acoperite cu fascicul laser [43]

Pentru a obține o îmbinare acceptabilă s-au încercat mai multe variante prin modificarea rostului sau prin utilizarea diferitelor tipuri de lasere. Utilizând un laser pulsant  $\text{CO}_2$  sau Nd:YAG la diferite frecvențe s-a încercat să se obțină calități corespunzătoare ale îmbinării fără a îndepărta zincul dintre suprafețele suprapuse. Cu toate acestea calități corespunzătoare ale îmbinării se obțin doar dacă se utilizează un mic interstițiu între table. Alți parametri cum ar fi grosimea stratului zincat, tipul stratului, puterea laserului și tipul laserului nu afectează calitatea îmbinării sudate.

O calitate corespunzătoare se obține atunci când se îndepărtează stratul acoperitor de pe suprafața tablelor care se suprapun, dar în acest caz intervine o operație suplimentară care nu este acceptată în practică totdeauna. În aceste condiții se preferă să se utilizeze distanțiere între tablele suprapuse și cu o ventilație corespunzătoare zincul se poate evapora din îmbinarea sudată (fig 3.2.b). Aceste interstiții sunt de 0,04 până la 0,3 mm funcție de tipul acoperirii, grosimea stratului acoperitor și de ventilația care se face la locul sudării.

Oțelurile acoperite mai pot fi sudate cu fascicul laser modificând geometria suprapunerii așa cum este prezentat în figura 3.2.c. În acest caz se creează un interstițiu utilizând un dispozitiv de fixare cât mai simplu. Dificultatea utilizării acelei tehnologii constă în aceea că este necesar un interstițiu cuprins între limite foarte înguste și care este sensibil la variațiile parametrilor de proces.

În acest sens se utilizează în prezent o altă configurație a geometriei rostului, prezentată în figura 3.3. Un avantaj al acestei geometrii a îmbinării este aceea că piesele ce se sudează se află în contact în timpul operației de sudare și se utilizează o ventilație corespunzătoare între table pentru a îndepărta vaporii de zinc. Calitatea îmbinării nu este sensibilă la variații ale dimensiunii geometrice a rostului și de asemenea rostul poate fi realizat relativ ușor.

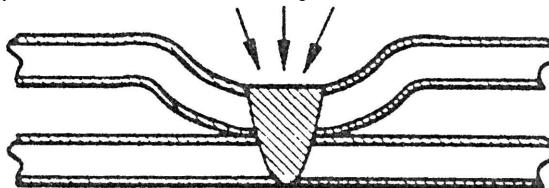


Fig. 3.3 Geometria rostului la sudarea prin suprapunere cu fascicul laser [43]

Oțelurile acoperite pot fi îmbinate și cap la cap, caz în care rezistența îmbinărilor sudate este mai mică, dar nu necesită pregătire specială a rostului. În tabelul 3.8 sunt dați parametri la sudarea cap la cap a diverselor tipuri de oțeluri acoperite.

Tabelul 3.8 Parametri la sudarea cu fascicul laser a diverselor tipuri de acoperiri [104]

Tipul materialului	Grosimea metalului de bază mm	Puterea laserului KW	Grosimea stratului deșus $\mu\text{m}$		Viteza de sudare m/min	Coeficientul de absorbție %
			Suprafață superioară	Suprafață inferioară		
Oțeluri imersate în zinc	0,95	5	23	28	4-6	80-93
Oțel galvanizat cu zinc	0,70	4	9	8	6-9	80-95
Aliaje fier zinc	0,75	4	11	12	6-8	88-115
Strat de plastisol de $15 \mu\text{m}$ peste stratul de zinc imersat	0,65	2,7	170	38	4-5,5	75-100
Strat de poliester de $5 \mu\text{m}$ peste stratul de zinc galv.	0,78	2,7	31	9	4-5,5	75-100



## 3.2 Sudobrazarea oțelurilor acoperite

### 3.2.1 Metalurgia sudobrazării oțelurilor galvanizate

Sudobrazarea poate fi considerată un proces special la limită al brazării respectiv sudării, având asemănări cu ambele procese de îmbinare [37].

Se aseamănă cu brazarea pentru că se utilizează un material de adaos la fel ca și la brazare, dar spre deosebire de aceasta materialul de adaos nu este distribuit pe materialul de bază sub efectul capilarității, ci sub forma unei sârme electrod la fel ca și în cazul sudării, sursa termică utilizată putând fi flacăra de gaze, arcul electric, arcul de plasmă etc. Tipic brazării, materialul de bază nu este topit, ci doar materialul de adaos. Îmbinarea în cazul sudobrazării are loc ca urmare a depunerii materialului de adaos pe suprafața încălzită, nu topită a materialului de bază în aceeași manieră ca și la sudarea convențională [36].

În figura 3.4 este prezentată o macro-structură a unei îmbinări obținută prin sudobrazare a unor table galvanizate. Așa cum se poate observa macroscopic nu există metal de adaos în îmbinarea dintre cele două table. Aceasta deoarece când materialul de adaos intră în contact cu suprafața materialului de bază, temperatura materialului de adaos se reduce rapid datorită conductibilității termice a materialului de bază, iar această temperatură scăzută a materialului de bază face ca materialul de adaos să adere pe o suprafață redusă pe materialul de bază.

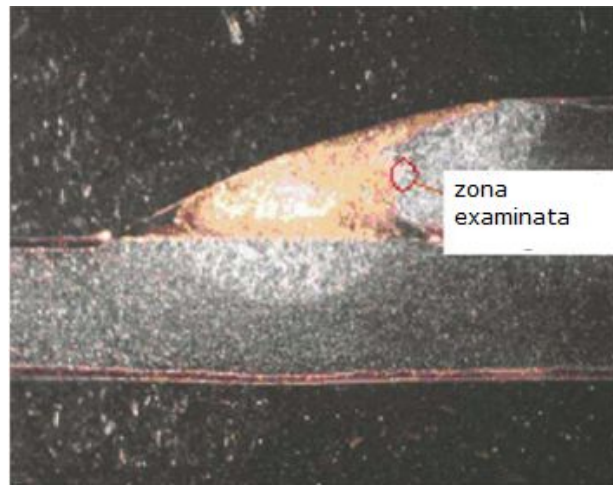


Fig. 3.4 Îmbinare prin sudobrazare a tablelor galvanizate [33]

Pentru a se putea observa transformările metalografice ce au loc la o îmbinare prin sudobrazare a oțelurilor acoperite cu zinc s-a ales o zonă dintre materialul de bază și materialul depus în care s-a făcut investigația (figura 3.5).

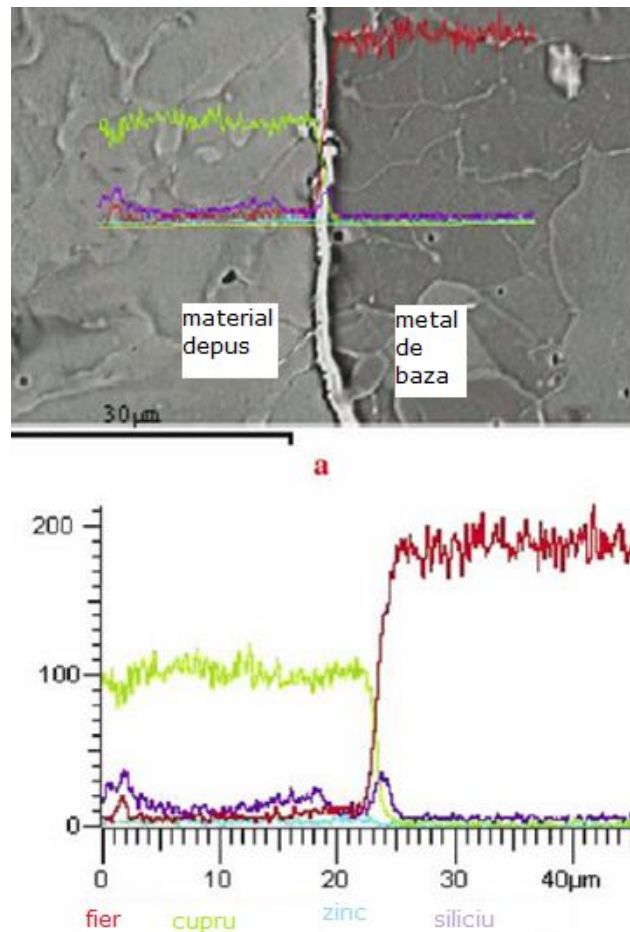


Fig. 3.5. Analiza difuziei elementelor la îmbinarea prin sudobrazare a tablelor galvanizate [33]

Urmărind difuzia elementelor materialul de adaos înspre materialul de bază și reciproc, rezultatele arată că deși la suprafața îmbinării există un strat de zinc conținutul de zinc din îmbinarea sudobrazată este foarte mic și chiar nu se observă elemente ale zincului în această îmbinare. Este posibil așadar ca stratul de zinc de la suprafața îmbinării să se evapore în timpul procesului de îmbinare, datorită temperaturii de evaporare scăzute a zincului. De asemenea zincul formează cu oxigenul oxidul de zinc  $ZnO$  care iese la suprafața îmbinării. În timp ce stratul de zinc se evaporă, materialul de adaos lichid intră direct în contact cu materialul de bază care este un oțel, ceea ce este favorabil pentru a se pute realiza îmbinarea. Materialul de adaos folosit cel mai adesea la îmbinarea prin sudobrazare a tablelor galvanizate este  $CuSi3$ . Din această cauză în materialul de bază se pot observa cantități de  $Cu$  și  $Si$ , datorită difuziei acestor elemente în timpul procesului. Concentrația acestor elemente în oțel este ridicată deoarece raza atomică a siliciului este mică, iar coeficientul de difuzie este mare, conducând astfel la difuzia  $Cu$  și  $Si$  în oțel. Pe cealaltă parte a îmbinării se observă elemente ale fierului, aceasta deoarece conținutul în  $Fe$  a materialului de bază este ridicat acesta se dizolvă în îmbinarea lipită. Datorită temperaturii ridicate materialul de adaos devine lichid, iar

elementele acestuia –Cu și Si- difuzează înspre suprafața materialului de bază. De asemenea dizolvarea Cu în Fe este foarte redusă, și datorită concentrației mai mari de 4% la suprafață când se formează soluții solide dintre Cu și Fe care se dizolvă dinspre materialul de adaos și cel de bază. Astfel se formează la interfața dintre metale anumite straturi cu aliaje Cu-Fe. Încercări de micro-duritate efectuate în aceste zone indică creșterea durității pe o zonă lângă linia de fuziune, iar în materialul de adaos această micro-duritate este redusă (figura 3.6).

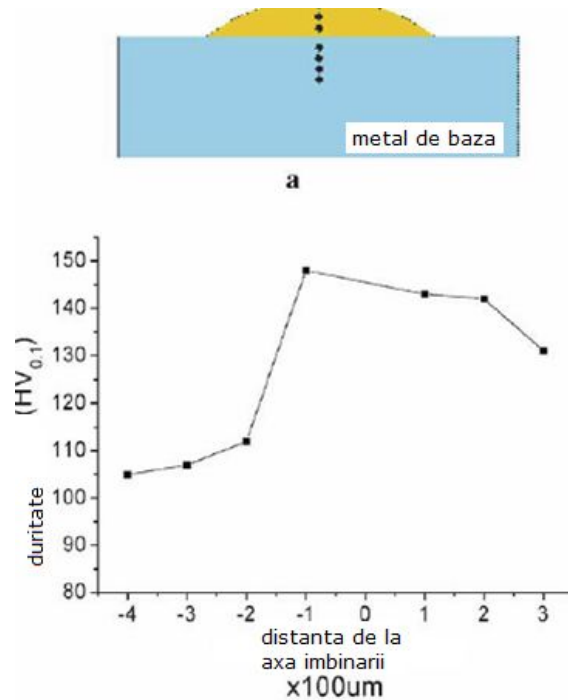


Fig. 3.6 Valorile durității la interfața dintre materialul de adaos și materialul de bază [33]

### 3.2.2 Procedee de îmbinare prin sudobrazare a oțelurilor acoperite

#### 3.2.2.1 Particularități la îmbinarea prin sudobrazare a oțelurilor acoperite

Oțelurile acoperite pot fi îmbinate prin sudare, lipire și îmbinare mecanică. Se preferă varianta lipirii, deoarece aportul de căldură în zona îmbinării este mult mai mic. Din această cauză straturile superficiale cum ar fi cel obținut prin zincare sunt mai puțin expuse deteriorării, iar deformarea pieselor este de asemenea mai mică.

Sudobrazarea este procedeul cu aplicabilitatea cea mai mare la îmbinarea oțelurilor acoperite, în domeniul construcțiilor de autovehicule. Acest procedeu permite evitarea problemelor de sudare care apar la piesele zincate. Problemele care apar la sudarea oțelurilor acoperite sunt:

- Fisurile se formează prin amestecarea zincului cu metalul depus prin sudare, ca urmare a depunerii zincului la limita grăunților și datorită influenței tensiunilor interne. Nivelul de tensiuni care determină declanșarea procesului de fisurare apare doar în cazul oțelurilor de mare rezistență și numai la tablele groase. În consecință la sudarea tablelor subțiri fisurarea nu are o importanță semnificativă;

- Porozitatea. Datorită temperaturii de evaporare scăzute a zincului, 906°C acesta se evaporă în timpul procesului de sudare. Dacă evaporarea se produce la suprafața piesei atunci vaporii de zinc se degajă sub formă de fum, în schimb dacă zincul se găsește în interior cum ar fi la îmbinarea tablelor suprapuse rămâne între componente și se pot forma suflurile în metalul depus. Cu cât tablele sunt mai subțiri acest pericol dispare deoarece solidificarea este mai lentă și în consecință degajarea gazelor este mai bună.

- Înrautățirea comportării la sudare. Vaporii de zinc care pătrund în arcul electric înrautățesc proprietățile arcului, din cauza mării afinități a zincului față de oxigen. Prin legarea oxigenului liber crește tensiunea superficială a picăturilor materialului de adaos formate în cursul proceselor de transfer din arc, ceea ce conduce la intensificarea stropirii. Acest lucru este mai evident la sudarea prin procedeul MAG. Acest inconvenient impune curățirea foarte frecventă a duzei de alimentare cu gaz protector. Deoarece vâscozitatea metalului depus crește trebuie micșorată viteza de sudare. Datorită evaporării zincului se mărește și cantitatea de fum formată în timpul sudării, în așa fel încât valorile maxim admisibile la locul de muncă, referitoare la oxidul de zinc și la praf, sunt în mod obișnuit depășite;

- Evaporarea stratului de zinc. În jurul sudurii stratul anticoroziv este de obicei distrus. La tablele subțiri acest aspect este valabil și pentru partea opusă a îmbinării. Dacă zonele afectate sunt înguste sub 2-3 mm nu este necesară repararea lor, pentru ca zincul din zonele învecinate având o activitate mai ridicată protejează chimic oțelul mai puțin activ, prin efect catodic. Dacă zona afectată este mai largă atunci aceasta împreună cu sudura trebuie din nou acoperită cu zinc.

Îmbinarea prin sudobrazare este un procedeu de îmbinare a materialelor cu ajutorul unui material de adaos care are o temperatură de topire mult mai mică decât cea a metalului de bază. În acest caz metalul de bază nu ajunge la temperatura de topire în timpul procesului de îmbinare. La sudobrazarea în mediu de gaze protectoare se folosește ca materiale de adaos aliaje ale cuprului care au temperatura de topire mai scăzută decât a oțelului, arcul electric are rolul de a încălzi metalul de bază și de a topi materialul de adaos, procesul fiind asemănător unei îmbinări prin lipire. Gazele de protecție sunt gazele inerte ca argonul, dar se pot utiliza și amestecuri de gaze care conțin argon și mici cantități de gaze active respectiv oxigenul sau dioxidul de carbon.

Rostul în cazul îmbinării prin sudobrazare este similar cu cel utilizat în cazul sudării cu flacăra oxigaz. Procesul de sudobrazare se desfășoară similar cu cel al brazării, îmbinarea având loc în aceleași condiții.

În principal se utilizează ca sursă termică în cazul sudobrazării flacăra de gaze, dar recent s-au dezvoltat procedee de sudobrazare utilizând ca sursă termică arcul electric sau chiar arcul de plasmă. Astfel putem vorbi despre sudobrazarea MIG/MAG, sau sudobrazarea WIG.

Sudobrazarea are câteva avantaje deosebite față de sudarea prin topire. Aceste avantaje se referă la:

- căldura introdusă în materiale este mai mică decât în cazul sudării, în felul acesta putându-se crește viteza de sudare și implicit productivitatea;
- consumul de energie este mai mic,
- deformații mai reduse datorită căldurii mai reduse.

- materialul de adaos este relativ moale și ductil ceea ce conduce la prelucrări mecanice ulterioare ușoare și scad tensiunile reziduale în timpul îmbinării.
- îmbinarea are o rezistență corespunzătoare pentru multe aplicații industriale;
- materialele greu sudabile (sensibile la șocuri termice) pot fi îmbinate prin sudobrazare fără o preîncălzire a materialului de bază și cu o tendință redusă de fisurare, cazul sudării fontelor cenușii;
- posibilitatea îmbinării materialelor disimilare. Prin acest procedeu se pot îmbina cupru cu oțel, nichel cu cupru, oțel cu aluminiu. Echipamentul utilizat în cazul sudobrazării este unul similar cu cel folosit la sudare [35].

Dintre dezavantajele sudobrazării se remarcă rezistența îmbinării care este inferioară celei de la sudare prin topire și depinde de materialul de adaos utilizat.

Materialele de adaos utilizate în cazul sudobrazării sunt aliajele de cupru, în special aliajul 60%Cu și 40 % Zn, la care se adaugă mici cantități de Sn, Fe, Mn, și Si pentru a îmbunătăți caracteristica de curgere a materialului, pentru a împiedica volatilizarea zincului și pentru a crește rezistența și duritatea îmbinării. De asemenea se utilizează și aliajele cu Ni sau bronzuri cum ar fi Cu-Sn caracterizat prin creșterea rezistenței la coroziune.

Aplicațiile sudobrazării pot fi extinse în cazul tablelor subțiri datorită căldurii introduse în piese și la sudarea oțelurilor acoperite pentru că nu distruge protecția anticorozivă a acestora.

### **3.2.2.2 Îmbinarea oțelurilor MIG acoperite prin sudobrazare**

Principiul procedurii de sudobrazare MIG este exemplificat în figura 3.7. Materialul de adaos sub formă de sârmă este antrenat printr-un sistem de role, DAS și introdus în arzător prin intermediul pachetului de furtunuri. Deoarece materialul de adaos este mai moale decât sârma de sudare se impune să se utilizeze un dispozitiv de avans sârmă format din patru role (figura 3.8). De menționat că în acest caz, canalul rolor trebuie adaptat la diametrul materialului de adaos, acestea având o formă semicirculară. Furtunurile de alimentare trebuie să fie din teflon pentru a asigura o rezistență minimă la alunecare. De asemenea pachetul de furtunuri nu trebuie să fie mai lung de 3m. Alimentarea se face în condiții excelente prin sistemul de alimentare „push-pull”. Pentru o funcționare îndelungată se recomandă folosirea unui pistol răcit cu apă. În acest caz de îmbinare se folosește ca gaz protector gazul inert, dar se pot folosi și amestecuri de gaze dintre argon și mici cantități de oxigen și dioxid de carbon, 1-2,5%. Sursa de curent trebuie să fie de curent continuu și este preferat curentul pulsant datorită avantajelor pe care le prezintă.

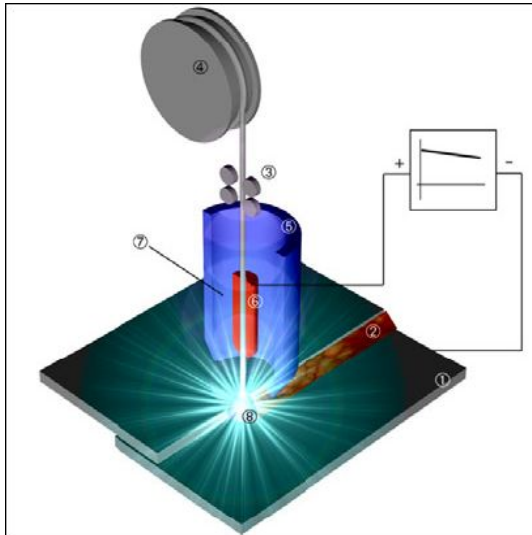


Fig. 3.7. Principiul procedurii de sudobrazare MIG [35]  
 1-piesa, 2-îmbinare lipita, 3-arc electric, 4- aliaj de lipit, 5- dispozitiv de avans sârmă, 6- gaz protector, 7- duză gaz protector, 8- duză de contact, 9- bobina de sârmă

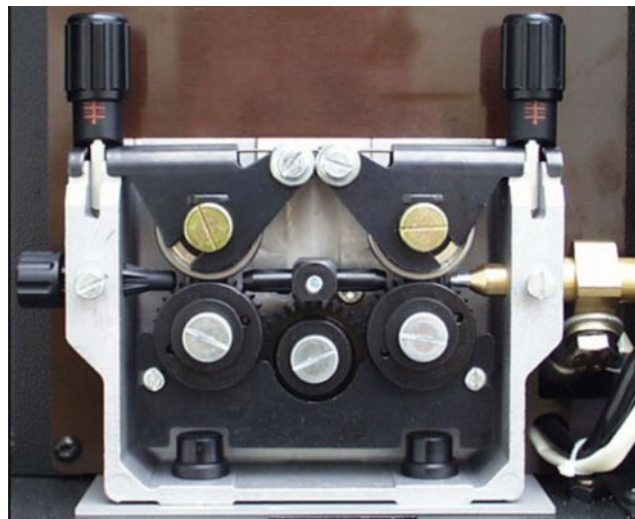


Fig. 3.8. Dispozitivul de avans sârmă pentru sudobrazarea MIG [35]

În tabelul 3.9 se prezintă efectul gazului de protecție asupra calității îmbinării funcție de sârma electrod utilizată. Se observă din tabel că folosirea amestecurilor de gaze este benefică. Astfel dacă se adaugă la gazul de protecție 2,5% CO<sub>2</sub> sau 1% O<sub>2</sub> rezultă o îmbunătățire a stabilității arcului, scade porozitatea și crește fluiditatea materialului depus.

Procedeu se folosește frecvent la îmbinarea oțelurilor acoperite, acoperite prin imersare sau galvanizare cu zinc și/sau aluminiu utilizate la construcția caroseriilor, aparatelor de răcire, fațadelor, acoperișurilor etc. În figura 3.9 se prezintă o astfel de îmbinare.

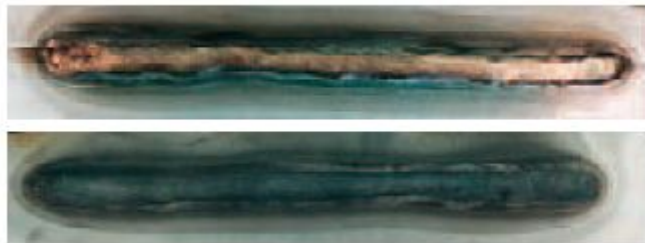


Fig. 3.9. Îmbinare sudobrazată MIG a tablelor zincate [25]

Tabelul 3.9 Efectul gazului de protecție la sudobrazarea MIG [35]

Material de adaos	Gaz de protecție	Stabilitatea arcului	Porozitate	Conductivitate termică	Aspect îmbinare	Fluiditate
SG-CuSi3	Argon	+	0	++	+	0
	99%Ar, 1%O2	++	++	0	++	++
	97.5%Ar, 2.5%CO2	++	+	0	+	++
	98%Ar, 2%N2	++	-	0	++	++
	98%Ar, 2%H2	+	-	0	+	0
	70%Ar, 30%He	+	+	+	+	0
SG-CuAl8	Argon	+	++	++	+	+
	99%Ar, 1%O2	+	++	0	+	+
	97.5%Ar, 2.5%CO2	+	++	0	+	+
	98%Ar, 2%N2	-	+	-	-	0
	98%Ar, 2%H2	-	-	-	0	0
	70%Ar, 30%He	++	++	++	++	++
SG-CuSn10	Argon	++	0	++	+	+
	99%Ar, 1%O2	++	+	0	++	++
	97.5%Ar, 2.5%CO2	+	+	0	++	++
	98%Ar, 2%N2	++	-	0	-	++
	98%Ar, 2%H2	-	-	-	-	-
	70%Ar, 30%He	+	0	+	+	+

Obs: "++" – foarte bună; "+" – bună; "0" – medie; "-" – slabă.

După cum se poate observa din figură protecția anticorozivă a oțelului nu este afectată prin utilizarea acestui procedeu. În timpul procesului de sudare MIG stratul de zinc este distrus și prin aceasta nu se mai asigură o protecție anticorozivă a metalului de bază. Prin utilizarea procedurii de sudobrazare și utilizând un material de adaos care să garanteze protecția anticorozivă acest inconvenient este îndepărtat. Totodată sârmele de tipul EN-440 G2Si1 sunt utilizate și pentru reducerea porilor din îmbinare. Materialele de adaos cum ar fi aliajele de cupru oferă oțelului protecție anticorozivă și după sudare această protecție nu mai necesită să fie refăcută. Cuprul se caracterizează prin solubilitate mare față de zinc. Aliajul CuSi3 are temperatura de topire în jur de 910-1025°C față de temperatura de topire a zincului de 419°C. În timpul lipirii tari zincul lichid rămâne pe suprafața metalului de bază și astfel este inclus în îmbinare. Acesta împreună cu cuprul formează alama.

În figura 3.10 se prezintă o microstructură în care se observă formarea alamei pe suprafața metalului de bază. Prin culoarea mai deschisă ce indică proporția mai scăzută a zincului în cupru, respectiv o alamă de tip  $\alpha$ . Cu cât ne apropiem de stratul de zinc proporția zincului în cupru este mai ridicată deci se formează o alamă de tip  $\beta$ . Tranziția de la aliajul CuSi3 printr-un strat de alamă la stratul de zinc formează o protecție corespunzătoare împotriva coroziunii a materialului astfel îmbinat chiar și acolo unde stratul de zinc este mai subțire. Pentru reducerea evaporării zincului este indicat să se folosească curent pulsant.

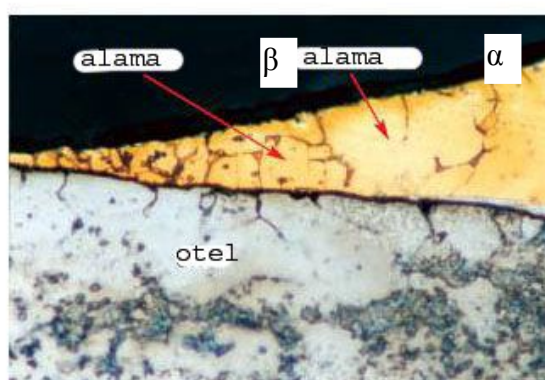


Fig 3.10 Microstructura de îmbinare sudobrazată MIG [25]

Dacă cantitatea de căldură introdusă la sudare este mare atunci o mare proporție de zinc se va evapora. Vaporii de zinc deviază transferul picăturii în baia metalică producându-se astfel stropiri intense la sudare. Din această cauză la sudarea oțelurilor acoperite prin zincare se recomandă a se utiliza o temperatură cât mai mică posibil. Curentul pulsant oferă cele mai bune condiții pentru îmbinarea acelor materiale.

Materialele pentru sudare sunt: sârma electrod care este un aliaj cupru-3%Si și gazul de protecție este argon sau amestecuri de argon cu 1-3%CO<sub>2</sub>, sau 1%O<sub>2</sub>. Prin introducerea acestor gaze în argon s-a constatat o îmbunătățire a stabilității arcului precum și un aspect mai bun a îmbinării. În tabelul 3.10 sunt prezentate principalele sârme utilizate în cazul îmbinării MIG prin sudobrazare a oțelurilor acoperite.



Tabelul 3.10 Principalele mărci de sârme utilizate la sudobrazarea MIG [35]

Tipul sârmei	Marca sârmei	Compoziția sârmei	Temperatura de topire °C
Bronz cu siliciu	SG-CuSi3	Cu+3%Si	910-1025
Bronz cu staniu	SG-CuSn6	Cu+6% staniu	910-1040
Bronz cu aluminiu	SG-CuAl8	Cu+8%Al	1030-1040

### **3.2.2.3 Îmbinarea oțelurilor acoperite prin sudobrazare cu aport termic scăzut, MIG-CMT**

O nouă metodă de îmbinare a tablelor galvanizate prin sudobrazare este varianta Cold Metal Transfer-CMT- dezvoltată de firma Fronius.

La sudarea CMT, se folosește tehnologia desprinderii asistate a picăturii. În cazul acestui procedeu de sudare, dacă parametrii tehnologici de sudare sunt corect trebuie, ar trebui ca la fiecare atingere controlată a sârmei de materialul de bază să se desprindă o singură picătură de material de adaos din sârma electrod. Rezultatul se poate numi „sudarea picătură cu picătură”[114, 115].

Îmbinarea tablelor galvanizate face parte din categoria îmbinărilor care nu se pot realiza prin procedee clasice, ci prin sudobrazare, utilizând echipamente de mare performanță tehnică, asigurând totodată fundamentarea condițiilor tehnologice pentru transferul și omogenizarea materialelor metalice similare și disimilare utilizând conceptul CMT; elaborarea soluțiilor de calificare tehnică a îmbinărilor; elaborarea și realizarea tehnologiei performante de laborator; experimentarea și demonstrarea funcționalității tehnologiei prin obținerea îmbinărilor sudate si/sau sudobrazate.

Procedeu de îmbinare prin sudare/sudobrazare, cu aport termic scăzut CMT se bazează pe un principiu tehnologic complet nou, asociat cu echipamente specifice.

Limita inferioară de aplicare a procesului de îmbinare cu aport termic scăzut (CMT) este mai redusă în comparație cu soluțiile convenționale cu arc scurt și transfer prin scurtcircuit, ceea ce asigură extinderea semnificativă a domeniului de sudare. Puterea termică, respectiv energia liniară de sudare la procesul CMT este mai scăzută în comparație cu a procedeelelor anterior menționate.

În cazul procedeelelor convenționale, cu arc scurt și transfer prin scurtcircuit, sârma are o mișcare de avans, până la producerea scurtcircuitului. Procesul este însoțit de stropire abundent, necontrolată.

În cazul procesului CMT, situațiile anterior menționate pot să fie evitate, deoarece sârma pentru sudare efectuează deplasare de înaintare și retragere față de piesa, cu frecvența ridicată. Aceasta face diferența de fond între procesul CMT de procedeu MIG/MAG convențional:

Oscilațiile cu frecvență ridicată a sârmei contribuie direct în controlul procesului. Frecvența de oscilație a sârmei variază în timp, în funcție de formarea scurtcircuitelor, dar media este de cca. 70 Hz.

Transferul de metal se face aproape fără curent de sudare, în timp ce la procedeu convențional de sudare, cu arc scurt, transferul prin scurtcircuit se datorează unui curent mare de sudare.

Procesul CMT este deosebit de flexibil, uzează de controlerul de proces pentru monitorizarea tehnologică a parametrilor de lucru, asigură informații asupra etapelor principale. Astfel, este posibil, pentru prima dată, să se efectueze

combinații ale procedului CMT, cu procedeul de sudare cu arc pulsant. Din acest motiv, energia liniară de sudare și pătrunderea, influențează favorabil geometria sudurilor.

Avantajele utilizării acestui procedeu de sudare sunt:

- se pot suda materiale de grosimi mici, sub 0,8 mm;
- se pot utiliza diametre mari ale sârmei electrod cu curent de sudare mic. La sârmă cu diametrul de 1,2mm se poate utiliza un curent  $I_s = 65A$ ;
- poziție bună de sudare;
- căldura introdusă în piesă este mai mică cu aproximativ 30% față de sudarea MIG/MAG clasică;
- deformații mici;
- procedeul se pretează la mecanizare completă.

În figura 3.11 este prezentat, schematizat, modul de transfer al picăturii de metal la procedeul CMT.

- etapa 1 este perioada în care arcul electric arde are loc topirea sârmei și formarea picăturii metalice în vârful sârmei electrod. Concomitent cu topirea sârmei are loc și avansul sârmei electrod spre baia metalică;

- etapa 2 corespunde momentului în care sârma ajunge în contact cu baia metalică formată pe materialul de bază, arcul electric se stinge. Curentul și tensiunea de sudare scad la o valoare apropiată de zero;

- etapa 3 corespunde momentului în care curentul și tensiunea arcului scad la o valoare mică, apropiată de zero, microprocesorul instalației de sudare detectează acest fenomen și comandă motoreductorului de curent alternativ din pistolul de sudare retragerea sârmei electrod, astfel încât are loc desprinderea asistată a picăturii în perioada de scurtcircuit. Curentul de scurtcircuit se menține în continuare la o valoare foarte mică;

- etapa 4 corespunde momentului ruperii punții de metal dintre picătură și vârful sârmei, microprocesorul comandă automat reaprinderea arcului electric, concomitent cu întreruperea comenzii de retragere a sârmei, astfel încât sârma va începe din nou să se îndrepte spre baia metalică, procesul de sudare ajungând din nou în etapa 1.

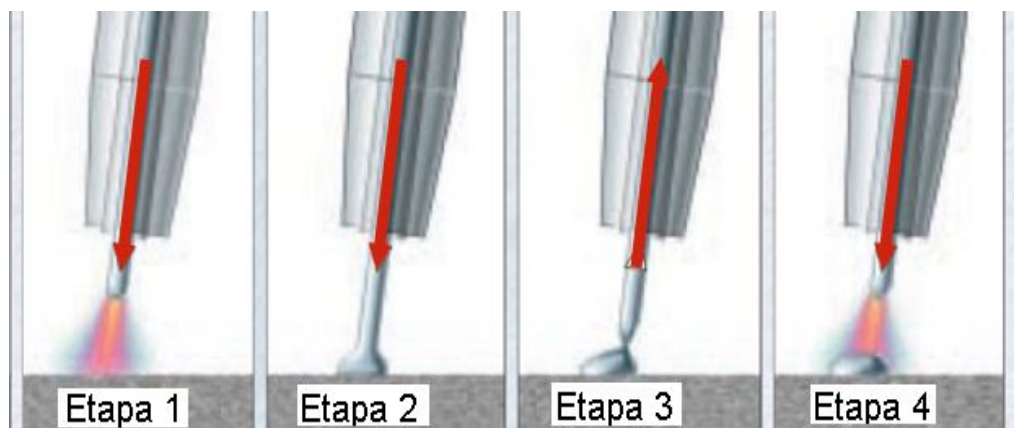


Fig. 3.11 Modul de transfer al picăturii de metal la procedeul MIG-CMT [114]

Din graficul din figura 3.12.b se observă că în etapa 1 de sudare, parametrii de sudare sunt cei prestabiliți de către operatorul sudor.

În momentul în care are loc scurtcircuitul electric, etapa 2, curentul și tensiunea arcului scad drastic, iar sârma își inversează sensul de deplasare.

În etapa 3, când are loc ruperea punții metalice tensiunea arcului crește brusc la o valoare mai mare decât cea prestabilită. De asemenea și curentul de sudare crește la o valoare mai ridicată față de cea prescrisă, iar sensul de deplasare a sârmei electrod se inversează într-un mod mai lent, până la valoarea setată inițial, moment în care procesul de sudare trece din etapa 4 în etapa 1.

În figura 3.12 este prezentat modul de transfer al picăturii, în timp real, la sudarea prin procedeul CMT, iar în figura 3.13 este prezentată variația parametrilor în timpul sudării.



Fig. 3.12. Modul de transfer al picăturii în timp real

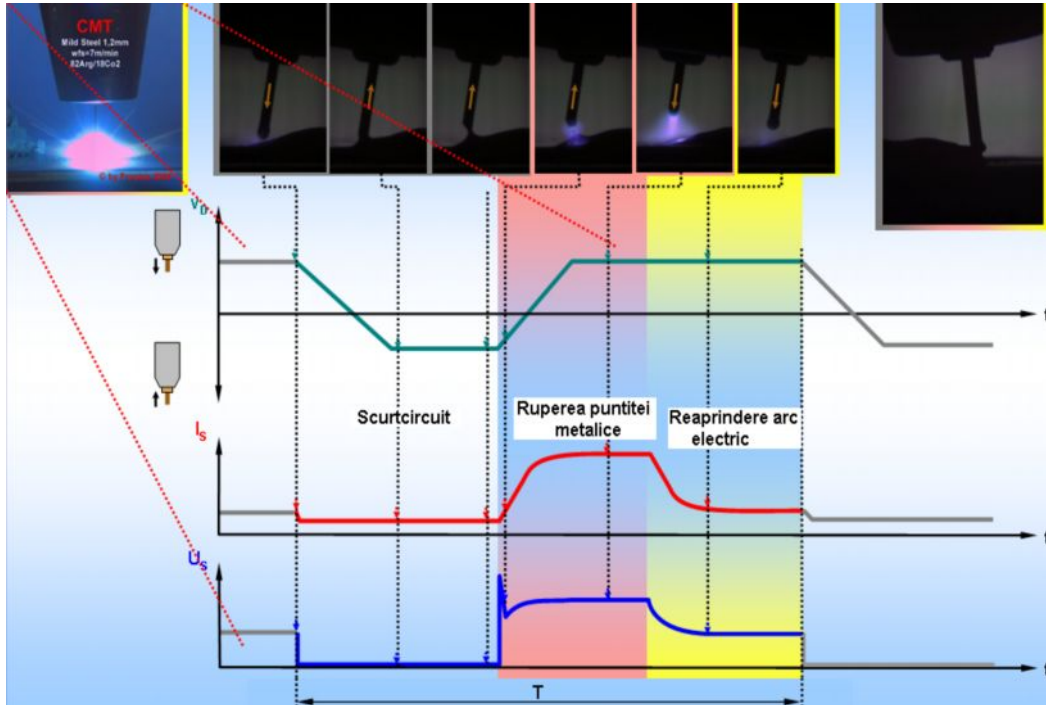


Fig. 3.13. Variația parametrilor în timpul sudării [45]  
 $v_0$  [m/min] = viteza sârmei electrod;  $I_s$  [A] = curentul de sudare;  $U_s$  [V] = tensiunea arcului;  $T$  [s] = durata unui ciclu;  $t$  [s] = timpul.

Prin utilizarea acestui tip de transfer se poate face îmbinarea diverselor tipuri de materiale cum ar fi îmbinarea între oțel și aliaje de aluminiu, Al-Mg, oțel-Mg, table galvanizate, de grosime mica, de asemenea se pot aplica procesele noi de îmbinare: sudobrazare, CMT-laser etc.

Avantajele procesului CMT prin sudobrazare face posibilă aplicabilitatea acestuia la componente metalice cu grosime 0,3 – 3,0 mm, cu posibilitatea extinderii la realizarea componentelor mijloacelor de transport, sisteme de climatizare specifice fabricației produselor alimentare, instrumentarului medical.

Particularități ale procesului se referă la:

- CMT intervine în proces și evita întreruperea explozivă a scurtcircuitului, iar energia este extrasă cu scurt timp înainte, cca.  $1\mu s$  de reamorsarea arcului;
- se asigură îmbinarea cap la cap, în colt, prin suprapunerea intimă între oțel și aliajele de aluminiu, Al-Mg, Oțel-Mg, subțiri, cu energie liniară redusă, viteză ridicată de sudare, fără generarea stropilor;
- posibilitatea realizării îmbinărilor de sudobrazare cu sârma CuSi, sau cu material pe baza de Zn, asigurând inclusiv îmbinarea materialelor galvanizate, cu menținerea straturilor anticorozive;
- procesul CMT se pretează la tehnologii semimecanizate, deoarece se intervine direct în sursa de sudare fără intervenția mecanică în avansul sârmei;
- capabilitatea de realizare a sudurilor cu deschideri variabile ale rosturilor dintre componentele de îmbinat;

- există posibilitatea cuplării proceselor CMT-laser pentru umectarea mai bună a materialului de adaos pe componente cu straturi galvanizate groase, sporind viteza de sudare;
- îmbinarea prezintă proprietăți structurale îmbunătățite, cu transformări structurale controlate și semnificativ atenuate față de procedeele tradiționale, cu efecte favorabile asupra caracteristicilor mecanice de utilizare: tenacitate sporită, duritate diminuată, rezistență la coroziune îmbunătățită;
- se permite îmbinarea prin sudare/sudobrazare a țevilor de aluminiu ale circuitelor de răcire inclusiv între țevi cu diametre semnificativ diferite: ramificații.

CMT asigură substratul științific și suportul tehnologic necesar pentru a putea realiza îmbinări prin sudobrazare, îmbinarea tablelor subțiri și îmbinarea materialelor incompatibile metalurgic [114].

#### **3.2.2.4 Îmbinarea oțelurilor acoperite prin sudobrazare WIG – varianta TOPTIG**

Sudarea TOPTIG este un procedeu de sudare care combină calitatea oferită prin sudare WIG cu productivitatea procedurii MIG. Aceasta se realizează prin modificarea pistolului de sudare WIG, prin introducerea mecanizată a materialului de adaos cu ajutorul unui sistem push-pull. Procedeu de sudare se poate aplica eficient la sudarea oțelurilor galvanizate, bronz, oțel inoxidabil, aluminiu. Aceste materiale sunt folosite frecvent în industria construcțiilor de automobile, iar prin procedeu TOPTIG se pot obține performanțe deosebite de îmbinare. Procedeu de sudare TOPTIG a fost inițial dezvoltat pentru aplicații ale sudobrazării tablelor galvanizate și a tablelor subțiri, până la 3mm, fiind un înlocuitor al procedurii de sudare robotizat MIG, deoarece se obțin suduri de calitate mai ridicată și se reduc operațiile de remediere post sudare față de procedeu MIG [20].

Sistemul TOPTIG include următoarele componente: robot și controler, sursa de sudare, pistolul TOPTIG, sistemul de antrenare a materialului de adaos și opțional sistemul de schimbare automată a electrodului de wolfram.

Datorită avantajelor pe care le conferă, productivitate ridicată, viteză mare de sudare, calitatea deosebită a îmbinării sudate, procedeu TOPTIG este o alternativă viabilă a sudării robotizate a tablelor subțiri, precum și a oțelurilor acoperite.

Sudarea TOPTIG constă în utilizarea electrodului nefuzibil de wolfram, iar materialul de adaos sub formă de sârmă electrod este introdus în arcul electric la marginea duzei de gaz sub un unghi bine specificat. Datorită acestuia materialul de adaos se topește în zona cea mai caldă a arcului electric, în zona cu temperatura cea mai ridicată ceea ce conduce la un transfer similar sudării MIG/MAG. Acesta inovație face ca varianta de sudare TOPTIG să se desfășoare la viteze de sudare chiar mai ridicate față de sudarea MIG/MAG. Totodată procesul se desfășoară fără stropi și nu este necesar un tratament termic post sudare. Un alt avantaj îl constituie posibilitatea sudării în spații înguste datorită formei compacte a pistolului de sudare, ceea ce nu este posibil la sudarea WIG tradițională.

Procedeu de sudare TOPTIG îmbină avantajele sudării WIG cu avantajele sudării MIG, având aplicații specifice la sudobrazarea oțelurilor galvanizate din industria de automobile, dar poate fi utilizat și în alte aplicații cum ar fi sudarea oțelurilor inoxidabile din industria alimentară sau la sudarea bicicletelor.

La varianta de sudare TOPTIG pistolul de sudare este modificat față de varianta WIG tradițională, așa cum se poate observa în figura 3.14. Sistemul de antrenare a materialului de adaos 2 trece prin duza de gaz 5 la un unghi de

aproximativ 20° față de electrodul din wolfram 1. Datorită acestei configurații materialul de adaos 4 este adus foarte aproape de electrod în zona care are temperatura cea mai ridicată din arcul electric. Prin aceasta materialul de adaos este topit mai rapid cu efecte benefice asupra ratei depunerii și a creșterii vitezei de sudare.

Varianta de sudare TOPTIG, pe lângă calitatea deosebită a îmbinării sudate și posibilitatea sudării tablelor foarte subțiri, oferă alte 2 avantaje importante:

- viteza de sudare (figura 3.15) - procedeul este utilizat pentru grosimi până la 3mm și permite viteze de sudare chiar mai mari decât cele obținute la sudarea MIG. Calitatea și aspectul exterior sunt excepționale.
- accesibilitatea pistolului de sudare - comparative cu varianta convențională de sudare pistolul de sudare include și alimentarea cu material de adaos având o construcție ce permite accesul în spații mai înguste.

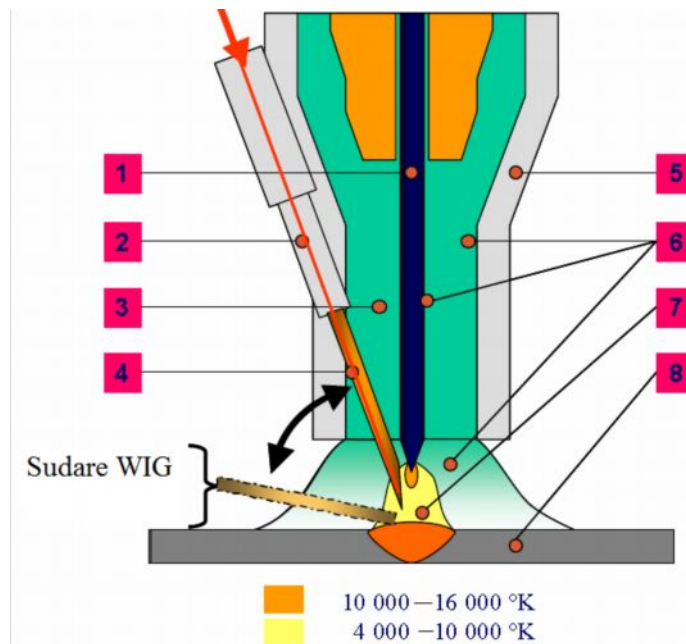


Fig. 3.14. Pistolul TOPTIG [20]:  
 1- electrod, 2- duza material de adaos, 3- , 4- material de adaos, 5- duza de gaz, 6- gaz de protecție, 7- arc electric, 8- piesă

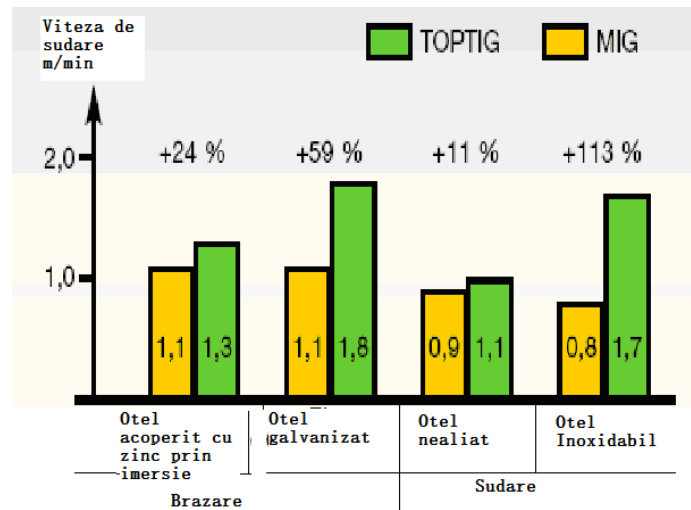


Fig. 3.15 Performanțele procedurii TOPTIG comparative cu procedeul de sudare MIG pentru diferite materiale [20]

#### Moduri de transfer

Datorită faptului că sârma de adaos este antrenată în zona cu temperatura cea mai ridicată a arcului electric, aceasta poate fi topită și transferată băii metalice prin două moduri de transfer așa cum se poate observa în figura 3.16. Modul de transfer depinde de viteza de avans a sârmei electrod și poate fi sub formă de picături sau sub formă neîntreruptă de metal lichid. Modul de transfer continuu de metal lichid oferă posibilitatea optimă de control a pătrunderii și de asemenea reduce oscilația băii metalice.

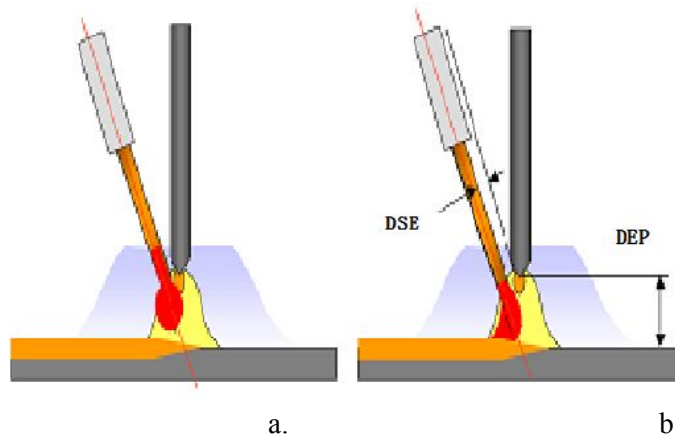


Fig. 3.16 Modul de transfer funcție de viteza de avans sârma [20]  
 a. transfer picătură cu picătură; b. transfer continuu printr-o punte de metal lichid

- Modul de transfer continuu

Când viteza de avans a sârmei electrod și energia arcului electric ajunge la

echilibru se stabilește un contact continuu între sârma electrod topită și piesa de sudat. În figura 3.17 se prezintă filmări rapide ale acestui tip de transfer cu prezentarea completă a ciclului de sudare de la amorsarea arcului până la stingerea acestuia.

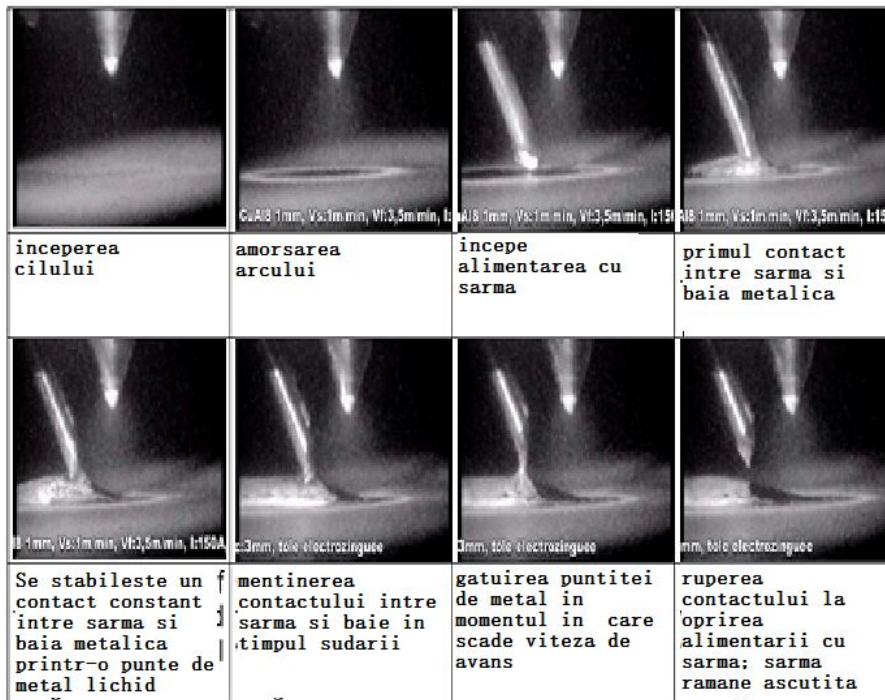


Fig. 3.17 Modul de transfer continuu în timpul unui ciclu complet de sudare a tablelor galvanizate folosind sârma de CuAl8 ,  $\varnothing 1$  mm  $I_s=150$ A,  $v_{as}=3.5$  m/min,  $v_s=1$  m/min,  $s=3$  mm [20]

Principalele avantaje ale acestui mod de transfer sunt:

- arcul electric este foarte stabil cu rată ridicată de depunere și viteză mare de sudare;
- aspectul sudurii este uniform și fără pori;
- se reduce riscul contaminării cu wolfram a materialului de bază;
- sârma electrod rămâne ascuțită după un ciclu de sudare ceea ce determină aprinderea ușoară a arcului electric în etapa următoare

Acest mod de transfer poate fi aplicat utilizând orice sârmă de adaos de sudare sau sudobrazare, inclusive oțel carbon, oțel inoxidabil sau aluminium.

- Modul de transfer picătură cu picătură

Acest mod de transfer este caracterizat printr-o repetare succesivă a fazelor începând cu amorsarea arcului electric și formarea picăturii la capătul sârmei electrod, creșterea picăturii până la desprinderea acesteia datorită forței gravitaționale și efectului tensiunii superficiale. Modul de transfer este similar cu



transferul prin scurtcircuit de la sudarea MIG/MAG și prezintă următoarele avantaje:

- se obține o microstructură favorabilă a sudurii datorită permiterii degajării gazelor din baia metalică;
- se poate opera cu valori reduse ale curentului și ale vitezei de avans a sârmei electrod;
- se obține o sudură cu lățime mai mare.

În figura 3.18 se prezintă cu ajutorul filmărilor rapide acest mod de transfer.

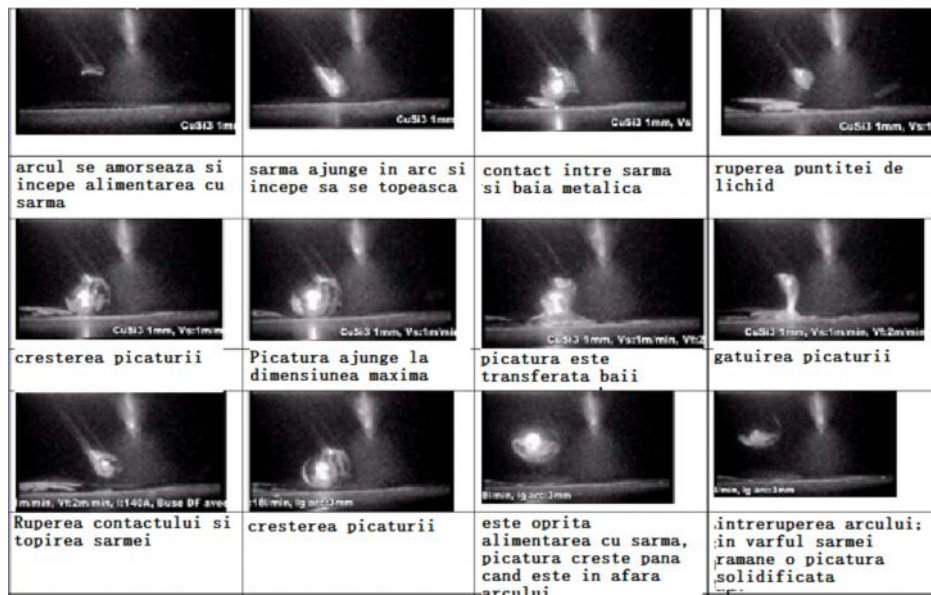


Fig.3.18 Modul de transfer prin picătură cu picătură la un ciclu complet de sudare a tablelor [20] galvanizate utilizând sârma de adaos CuSi3 Ø1 mm  $I_s=140$  A,  $v_{as}=2$  m/min,  $v_s=1$  m/min,  $s=3$  mm

Diametrul picăturii este mai mare la viteze de avans mai mici, 3-4 ori diametrul sârmei electrod fiind similar cu un transfer globular prin arc scurt.

Modul de transfer picătură cu picătură depinde foarte mult de diametrul picăturii precum și de frecvența acesteia: o viteză de avans mai mare conduce la o frecvență mai mare a picăturilor precum și la un diametru mai mic al acestora. În diagrama din figura 3.19 se prezintă influența vitezei de avans a sârmei la un curent constant asupra frecvenței picăturii. Zona de tranziție dintre transferul prin picături și transferul continuu sub forma unei punți metalice lichide este foarte îngustă; acesta se poate distinge și printr-un zgomot specific, cele două moduri de transfer fiind astfel ușor de detectat.

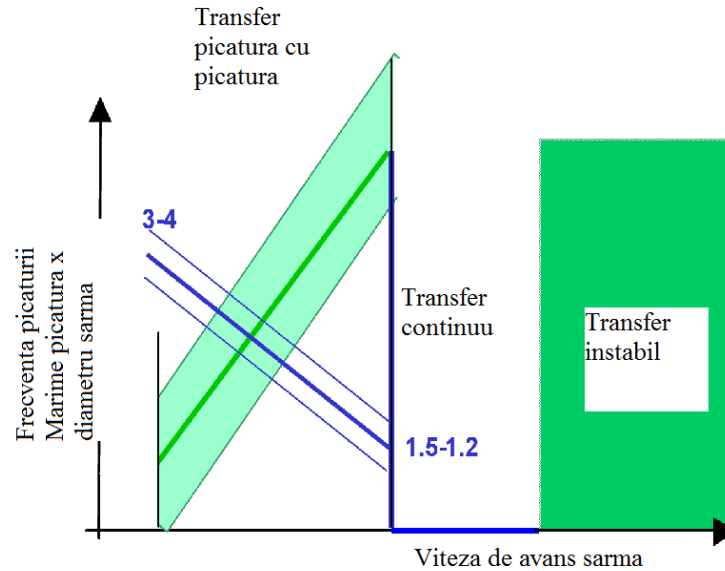


Fig. 3.19 Influența vitezei de avans asupra modului de transfer [20]

#### Aspecte tehnologice

Principalele aspecte tehnologice ce caracterizează procedeul TOPTIG se referă la:

- Distanța electrod - material de adaos - este un parametru foarte important al procesului TOPTIG și trebuie ales în funcție de diametrul sârmei între  $1-1,5x d_s$ .
- Cel mai utilizat electrod în curent continuu este electrodul EWCe2- cu diametrul de 2,4 mm sau 3,2 mm folosind limitele de curent între 230A și 300A; cu recomandările de la varianta WIG standard. Acest electrod poate fi utilizat și în curent alternativ, iar la aplicații ce necesită un curent mic de sudare se poate utiliza și diametre mai mici de electrod, însă trebuie specificat că utilizarea unui diametru de 1,8 mm poate avea ca rezultat o deformare termică axială a electrodului cu implicații asupra distanței electrod - material de adaos, parametru "cheie" al acestei variante de sudare.

- Diametrul sârmei este ales funcție de grosimea materialului de bază.

Pentru oțel sunt recomandate următoarele diametre de sârmă:

- $s < 1\text{mm}$ : se alege  $\varnothing 0,8\text{ mm}$
- $1\text{mm} < s < 1,5\text{mm}$ : se alege  $\varnothing 1\text{ mm}$
- $1,5\text{mm} < s < 4\text{mm}$ : se alege  $\varnothing 1,2\text{ mm}$

În cazul sudării aluminiului sau în cazul sudobrazării cu sârmă de CuAl sau CuSi diametrul ales funcție de grosime trebuie să fie mai mare cu o treaptă. Diametrul sârmei influențează rata de depunere și umectarea.

- Curentul de sudare are influență asupra pătrunderii și asupra ratei de depunere; curentul trebuie corelat cu tipul și grosimea materialului de bază, precum și cu viteza de sudare;
- Tensiunea arcului depinde de distanța dintre electrod și piesă, precum și de gazul de protecție folosit. Tensiune arcului influențează pătrunderea și lățimea sudurii, mărimea picăturii în cazul transferului prin picături și umectarea. Distanța




standard dintre electrod și piesă este de aproximativ 3mm. Lungimea arcului poate fi redusă în cazul transferului prin metal lichid sau mărită în cazul transferului prin picături.

Procedeul TOPTIG a fost destinat sudării sau sudobrazării tablelor subțiri acoperite prin galvanizare utilizate în industria automobilelor. Cele mai uzuale aplicații sunt pentru table acoperite cu zinc cu grosimi cuprinse între 0,8-1,5mm. Utilizarea acestui procedeu de sudare permite viteze de sudare de peste 1m/min obținându-se o foarte bună calitate a îmbinării. În tabelul 3.11 sunt date câteva recomandări pentru îmbinarea tablelor galvanizate.

Gazul de protecție ales pentru acest procedeu este argon pur caz în care viteza de sudare este mai redusă sau se folosește un amestec de Ar+H<sub>2</sub> caz în care se obțin îmbinări cu aspect mai bun.

Gazul de protecție nu trebuie să conțină o cantitate mai mare de 2,5 % H<sub>2</sub> deoarece poate conduce la apariția fisurilor.

Tabelul 3.11 Parametri de sudobrazare funcție de rostul îmbinării [20]

Rostul îmbinării	Oțel acoperit	Materialul de adaos	Curent A	Viteza de sudare m/min	Gaz /debit de gaz l/min
	Galvanizat (1 mm)	CuAl8 Ø 1 mm	180	1,75	Ar+H <sub>2</sub> /15
	Galvanizat (0,8 mm)	CuSi3 Ø 1 mm	80	1,3	Ar+H <sub>2</sub> /15
	Galvanizat (2 mm)	CuSi3 Ø 1,2 mm	155	1	Ar+H <sub>2</sub> /15
	Galvanizat (1 mm)	CuSi3 Ø 1,2 mm	140	1	Ar+H <sub>2</sub> /15
	Galvanizat (1,5 mm)	CuSi3 Ø 1 mm	130	1	Ar+H <sub>2</sub> /15

*Aplicații ale procedurii TOPTIG la îmbinarea oțelurilor galvanizate*

Procedul TOPTIG a fost dezvoltat pentru a fi folosit la îmbinare tablelor subțiri și în special a celor galvanizate acolo unde procedul MIG nu poate fi aplicat. Astfel de tipuri de îmbinări sunt frecvent întâlnite în industria construcțiilor de automobile.

În figura 3.20 se prezintă alegerea optimă a parametrilor de îmbinare în cazul tablelor galvanizate. Aceștia sunt valabili în cazul sudării în curent continuu, utilizând electrodul EWCe2 și gazul de protecție argon + hidrogen. Hidrogenul din gazul de protecție are efect asupra stabilității arcului la curent mic de sudare, o mai bună umectare și reducerea oxizilor de la suprafața îmbinării.

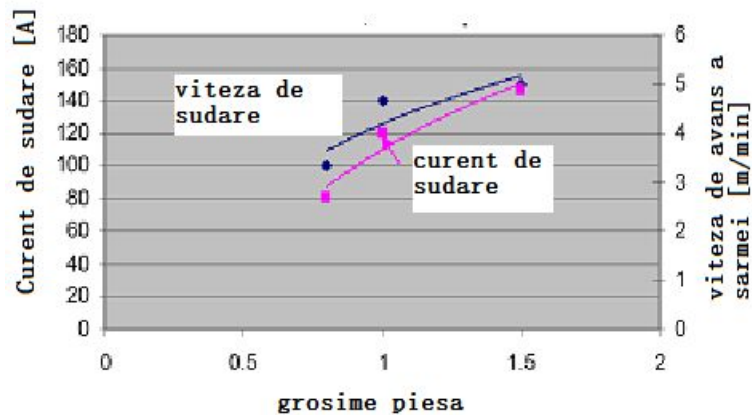


Fig. 3.20 Alegerea parametrilor la îmbinarea tablelor galvanizate prin sudobrazare TOPTIG folosind ca material de adaos sârma de CuSi3 și viteza de îmbinare de 1m/min [20]

Aplicațiile tipice de îmbinare prin sudobrazare a tablelor galvanizate sunt ilustrate în tabelul 3.12. Se arată diverse tipuri de îmbinare pe grosimi între 0.8mm până la 1,5 mm.

Procedul TOPTIG permite sudarea cu viteze de aproximativ 1m/min fără a influența negativ geometria îmbinării.

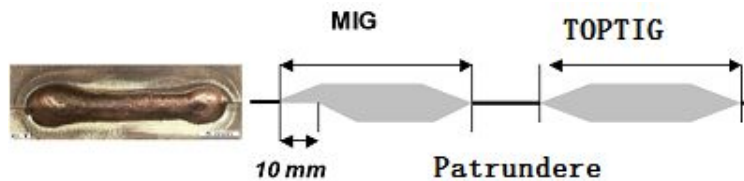








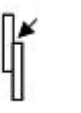



Fig. 3.21 Eficiența îmbinării TOPTIG comparativ cu MIG [20]

Tabelul 3.12 Aplicații ale sudobrazării TOPTIG [20]

Rost îmbinare	Grosime de material bază mm	Materialul de adaos	Curentul sudare A	Viteza sudare cm/min	Gaz protecție / debit gaz l/min	Aspect îmbinare
	1	CuAl8, Ø 1mm	115	60	Ar+H <sub>2</sub> /15	
	0,8	CuSi3 Ø 1mm	80	150	Ar+H <sub>2</sub> /15	
	2	CuSi3 Ø 1mm	155	100	Ar+H <sub>2</sub> /15	
	1	CuSi3 Ø 1mm	110	100	Ar+H <sub>2</sub> /15	
	1,5	CuSi3 Ø 1mm	130	100	Ar+H <sub>2</sub> /15	

Un alt avantaj al utilizării acestui procedeu îl constituie posibilitatea obținerii unor îmbinări scurte cu pătrundere bună pe toată lungimea îmbinării – figura 3.21. Acest aspect este mai dificil de realizat prin procedeu MIG deoarece pătrunderea la începutul sudării – pe aproximativ 10 mm- este mai redusă.

### **3.2.2.5 Îmbinarea oțelurilor acoperite prin sudobrazare hibridă laser-MIG**

Sudobrazarea hibridă laser-MIG este utilizată datorită avantajelor pe care le prezintă. Viteza de sudare și posibilitatea sudării fără pori, au un rol important în alegerea acestui procedeu. Sudarea laser convențională nu poate asigura ambele avantaje și din acest motiv se preferă sudarea hibridă laser-MIG, în literatura de specialitate denumită și sudobrazare laser.

Combinând avantajele celor două procedee convenționale de sudare laser și MIG pot rezulta tehnologii de sudare a tablelor galvanizate fără defecte de tipul porilor cu viteza de îmbinare foarte mare. Radiația laser conduce la o zonă influențată termic foarte îngustă cu un coeficient de zveltețe ridicat. În cazul sudării laser convenționale posibilitatea blocării porilor este foarte scăzută datorită focalizării fascicului pe o pată activă de diametru foarte mic, dar viteza de sudare poate fi foarte mare.

Densitatea de energie la procedeul de sudare MIG este mult mai redusă decât în cazul sudării laser datorită focalizării pe o pată activă de dimensiuni mai mari, dar este caracterizat printr-o bună capacitate de evitare a porilor în îmbinare. Deoarece la îmbinarea tablelor galvanizate există riscul de formare a porilor datorită vaporilor de zinc procedeul de îmbinare recomandat este sudobrazarea laser datorită îmbinării celor două avantaje: viteză de sudare mare și lipsa porilor în îmbinare.

Sudobrazarea laser - MIG include un sistem mecanizat de avans a sârmei electrod ceea ce conduce la scăderea cantității de căldură introdusă în componente. Folosirea unui procedeu de sudobrazare mecanizat este benefică în dauna utilizării procedeuului de sudobrazare manual deoarece calitatea îmbinării nu variază în timpul procesului. Astfel folosind fascicului laser în cazul sudobrazării se obține un control foarte precis al energiei introduce în componente [105].

La sudobrazarea oțelurilor acoperite prin galvanizare stratul acoperitor din zona îmbinării este deteriorat sau distrus și prin aceasta zona respectivă este susceptibilă la coroziune. Prin utilizarea sudobrazării laser zona în care stratul este distrus este foarte mică din această cauză protecția anticorozivă a oțelului nu este semnificativ afectată. O altă aplicație specifică sudobrazării laser este îmbinarea aliajelor de aluminiu cu oțelul caz în care oțelul este acoperit prin galvanizare cu zinc.

Datorită randamentului ridicat laserul CO<sub>2</sub> se utilizează în zona tăierii, iar laserul Nd:YAG se utilizează frecvent la sudure datorită flexibilității pe care o oferă comparativ cu laserul CO<sub>2</sub> care are un sistem mai rigid de ghidare a fascicului laser.

Procesul de sudare laser presupune utilizarea unor densități de energie mai mari de 10<sup>6</sup>W/cm<sup>2</sup> ceea ce conduce la obținerea unor pătrunderi mari la sudare. Varianta de sudare folosită este sudarea în "gaură de cheie", obținându-se astfel suduri foarte adânci și înguste. Acesta este principalul avantaj al sudării cu fascicule laser față de celelalte procedee de sudare cu arcul electric la care pătrunderea la sudare este influențată de conductivitatea termică a materialelor ce se sudează.

În figura 3.22 este prezentat principiul sudării hibride laser-MIG. Fascicului laser utilizat este Nd:YAG cu putere specifică de peste 10<sup>6</sup>W/cm<sup>2</sup> ceea ce conduce la formarea unei cavități în zona în care se sudează cu evaporarea metalului. Puterea specifică a arcului electric este de 10<sup>4</sup> W/cm<sup>2</sup>. Sudarea hibridă presupune combinarea celor două procedee de sudare într-un singur procedeu. Comparativ cu procesul individual de sudare laser pătrunderea și viteza de sudare sunt mai mari datorită

căldurii introduce de arcul electric. Radiația laser absorbită rămâne totuși la un nivel destul de scăzut. Temperatura piesei este un factor decisiv al absorbției radiației laser

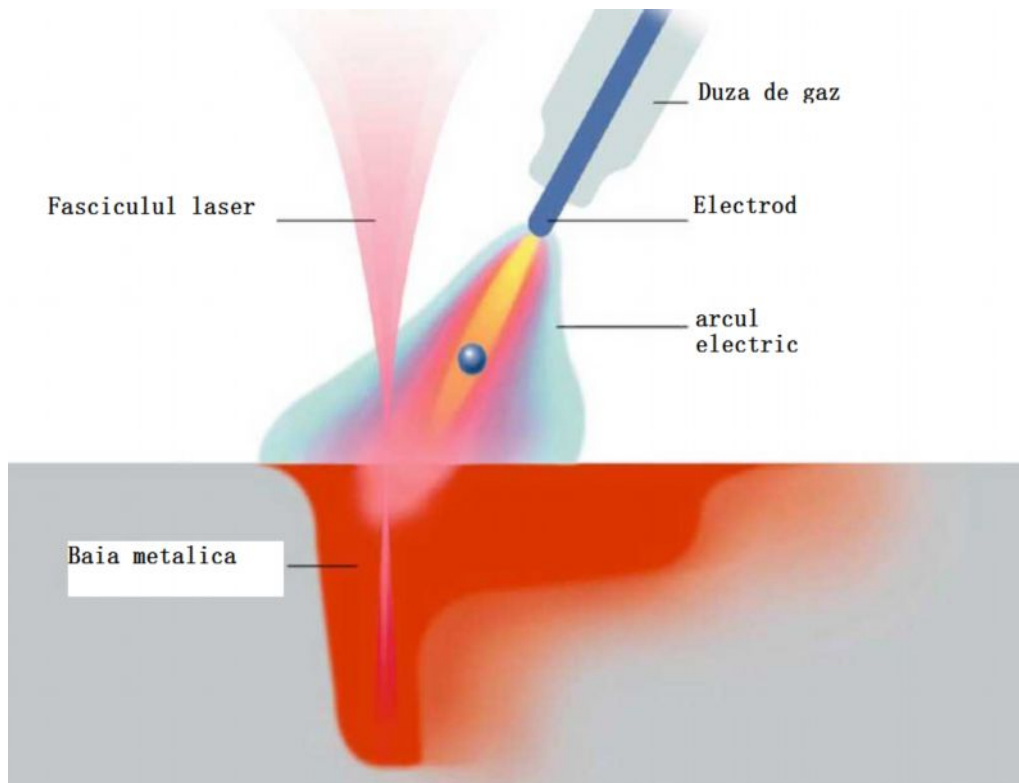


Fig. 3.22 Reprezentare schematică a zonei de sudare la procedeul hibrid laser-MIG [22]

În figura 3.23 se prezintă modul de transfer la sudarea hibridă laser-MIG

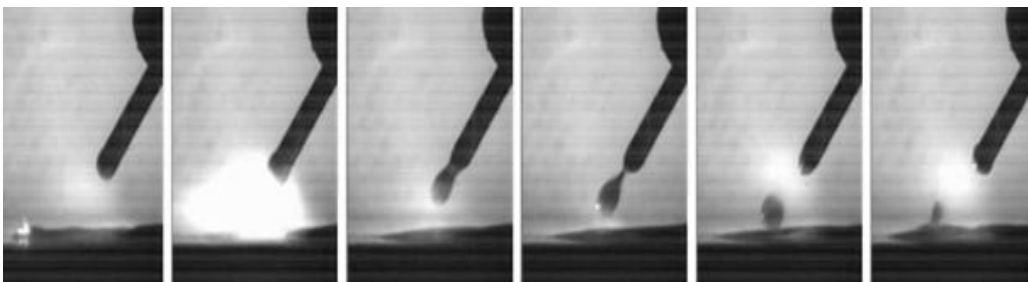


Fig. 3.23 Modul de transfer la sudarea hibridă laser-MIG [105]

Geometriei sudurii în cazul sudării laser este îngustă și adâncă având o ușoară concavitate, în schimb în cazul sudării MIG geometria sudurii prezintă o supraînălțare și o lățime mai mare având aceeași pătrundere ca și sudarea laser la

aceleași viteze de sudare. În cazul sudării hibride laser-MIG se constată o pătrundere similar cu procedeul MIG la o viteză de avans a sârmei de două ori mai mică decât viteza de avans necesară la sudarea MIG. De asemenea supraînălțarea în acest caz este diminuată, îmbinarea sudată având o geometrie mai bună decât în cazul sudării laser sau MIG separat (figura 3.24).

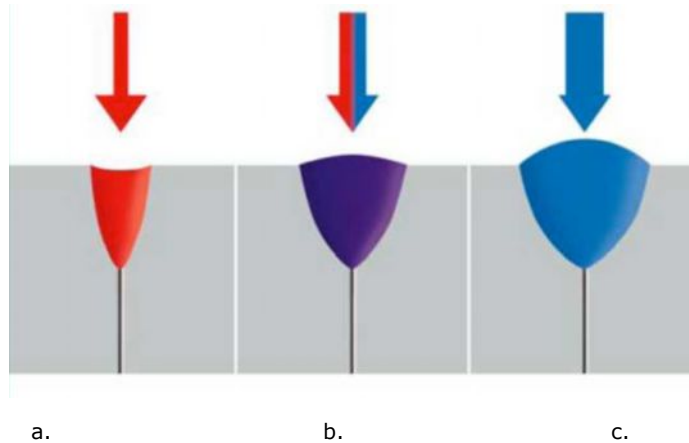


Fig. 3.24: Geometria îmbinării sudate obținută prin procedeele laser (a), MIG (c) și laser-MIG (b) la aceeași viteză de sudare [22]

Avantajele utilizării variantei hibride laser-MIG constau în combinarea avantajelor obținute la sudarea laser și la sudarea MIG. Comparând sudarea hibridă laser-MIG cu sudarea cu fascicul laser se pot evidenția anumite avantaje ale sudării hibride cum ar fi:

- posibilitatea obținerii unor îmbinări fără pori;
- pătrundere mai mare;
- lărgirea domeniului de aplicație;
- investiții mai scăzute prin necesitatea unui laser de putere mai mică;
- creșterea tenacității îmbinării;

Avantajele sudării hibride față de sudarea MIG sunt:

- viteză de sudare mai mare;
- pătrundere mai mare la viteze de avans sârmă mai mici;
- căldură mai mică introdusă în componente;
- rezistență mai mare a îmbinării;
- geometrie mai îngustă a sudurii [59];

Prin combinarea fascicului laser cu arcul electric MIG se formează o baie metalică mai lată comparativ cu sudarea laser. În consecință se pot îmbina rosturi mai largi.

Sudarea hibridă permite de asemenea viteze mari de sudare, baie metalică mai mică comparativ cu sudarea MIG rezultând astfel căldură mai puțină introdusă în component și zona afectată termic este mai îngustă. Prin viteză mai mare de sudare crește productivitatea și prin aceasta scad costurile produsului astfel îmbinat [19].



*Sudobrazarea hibridă laser-MIG a oțelurilor galvanizate*

Datorită proprietăților și avantajelor pe care sudobrazarea laser-MIG le are, acesta poate fi o alternativă interesantă la îmbinarea oțelurilor galvanizate comparativ cu procedeele convenționale de sudare. În figura 3.25 se prezintă schematic procesul de sudobrazare laser-MIG. Ușual la îmbinarea acestor materiale se utilizează ca material de adaos sârme electrod pe bază de cupru la fel ca și la sudobrazarea MIG: CuSi3, CuAl8, CuSn cu scopul de a reduce temperatura de topire a materialului de adaos și de a obține bune proprietăți metalurgice.

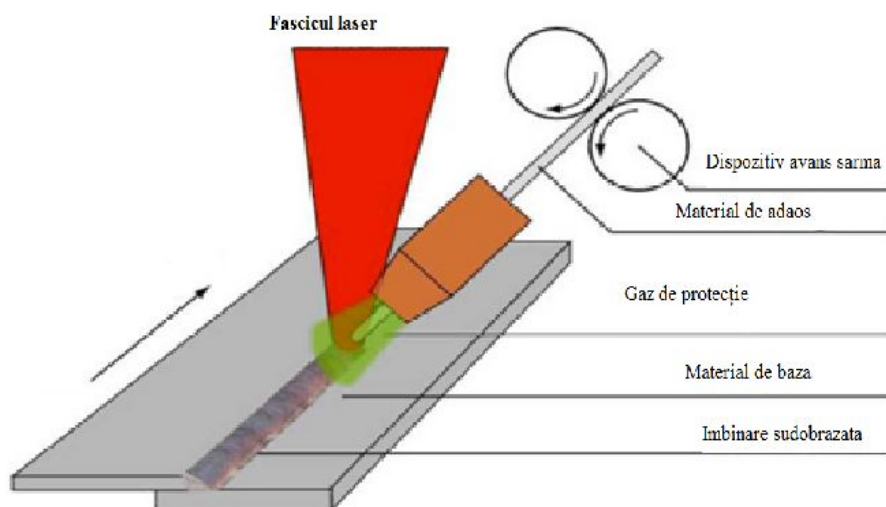


Fig. 3.25 Reprezentare schematică a sudobrazării laser-MIG [22]

Folosind sârmă încălzită se poate crește viteza de sudare și îmbunătățirea proprietății de umectare a materialului de adaos.

În figurile 3.26 și 3.27 se prezintă microstructura unor îmbinări prin suprapunere, respective cu margini rășfrânte obținute prin sudobrazare laser-MIG. Materialul de bază este acoperit cu strat de zinc pe ambele fețe cu o grosime de aproximativ  $3\mu\text{m}$ , iar materialul de adaos utilizat este sârma de CuSi3 cu diametrul de 1,6mm.

Componentele au grosimea de 1,5mm în cazul îmbinării prin suprapunere și s-a utilizat un curent de sudare de 206A la o viteză de sudobrazare de 3m/min.

În cel de-al doilea caz grosimea componentelor este de 0,8mm, curentul de sudobrazare de 210A, iar viteza de sudobrazare de 3m/min.

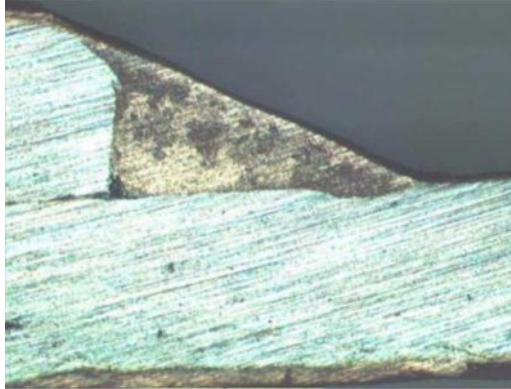


Fig. 3.26 Îmbinare sudobrazată laser-MIG prin suprapunere [88]

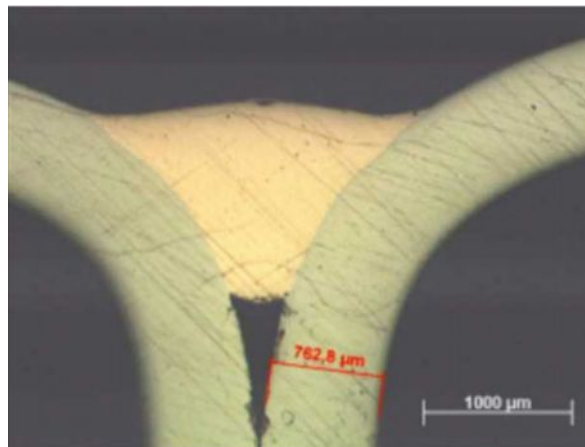


Fig. 3.27 Îmbinare sudobrazată laser-MIG cu margini răsfrânte [88]

### 3.3 Îmbinarea disimilară aluminiu-oțel galvanizat

Îmbinarea aluminiului cu oțelul poate conduce la îmbinătătirea caracteristicilor de exploatare a diferitelor componente utilizate în industrie. În special în industria construcțiilor de automobile, îmbinarea celor două metale reduce consumul de energie prin reducerea greutateii [27].

Îmbinarea celor două metale se făcea de obicei pe cale mecanică, iar îmbinarea prin sudare era dificil de realizat datorită formării unei faze intermetalice. Această fază intermetalică este fragilă și astfel deteriorează proprietățile mecanice ale îmbinării.

Utilizând un procedeu de sudare relativ nou Cold Metal Transfer, adică transfer cu aport termic scăzut, descris în subcapitolul 3.2 se poate îmbina prin sudare aluminiu cu oțel acoperit prin galvanizare cu zinc. Astfel se poate îmbina prin

sudare anumite aliaje de aluminiu cu oțel galvanizat. Aceste aliaje sunt de tipul 6000, AlMgSi și cu unele restricții aliaje de tipul 5000, AlMg.

Îmbinarea prin sudare a aluminiului cu oțelul conduce la obținerea unor avantaje deosebite datorită combinării proprietăților celor două materiale. Astfel prin utilizarea aluminiului se reduce semnificativ greutatea unei construcții metalice, crește conductibilitatea termică și electrică și se îmbunătățește rezistența la coroziune. Deasemenea prin utilizarea aluminiului în construcția caroseriilor la automobile scade consumul de energie datorită greutății mai reduse a construcției.

Îmbinarea prin sudare a aluminiului cu oțelul creează multe probleme. Diferențele mari ale proprietăților chimice și fizice dintre cele două materiale, precum și insolubilitatea aluminiului în oțel conduce la formarea unei faze intermetalice foarte fragile, grosimea acesteia depinde de căldura introdusă la sudare. Această fază intermetalică scade rezistența îmbinării. Căldura introdusă în timpul procesului de sudare duce la modificarea rețelei cristaline și formarea fazei intermetalice (fig.3.28).

Prin urmare pentru a putea realiza o îmbinare oțel cu aluminiu este necesar să limităm grosimea (în general volumul) acestei faze intermetalice care depinde de cantitatea de căldură introdusă în materiale în timpul sudării. Prin utilizarea procedurii de sudare cu aport termic scăzut (CMT) este posibilă îmbinarea oțelului cu aluminiu deoarece cantitatea de căldură introdusă la sudare este semnificativ mai redusă față de procedeele convenționale de sudare. Această fază intermetalică este un proces controlat de difuziune. De asemenea pentru a putea îmbina cele două materiale este nevoie ca oțelul să fie acoperit prin galvanizare cu zinc. Aceasta deoarece oțelul trebuie să aibă capacitate ridicată de umectare. Formarea fazei intermetalice este prezentată în figura 3.28.

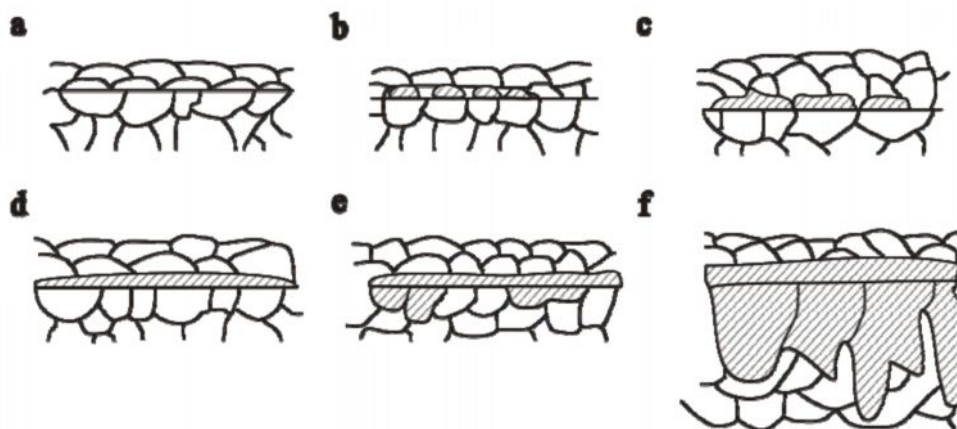


Fig. 3.28 Formarea fazei intermetalice între oțel și aluminiu [102]

- a. Formarea locală a soluției solide saturate în jurul imperfecțiunilor
- b. Formarea nucleului noii faze
- c. Creșterea orizontală a nucleului fazei de-a lungul îmbinării oțel-aluminiu
- d. Formarea unei faze secundare și creșterea primei faze
- e,f. Creșterea celei de a doua faze

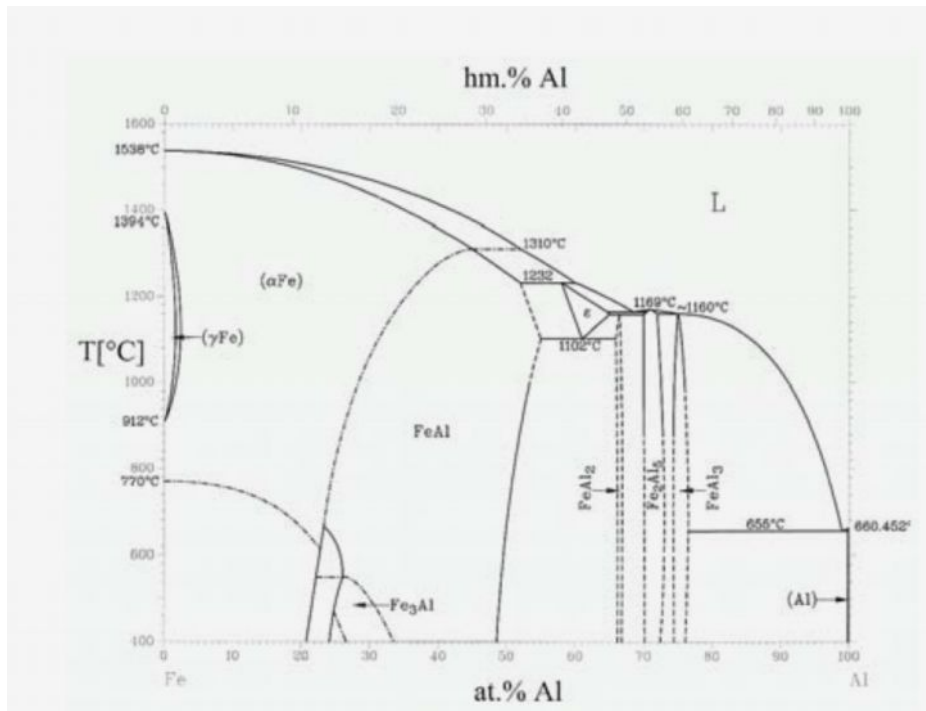


Fig.3.29 Diagrama de echilibru Al-Fe

Precum se observă din diagrama de echilibru (fig. 3.29) se formează constituenții  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  și  $\text{FeAl}_3$ . Aceste două faze conduc la deteriorarea proprietăților mecanice ale îmbinării datorită creșterii în microduritate până la valori de 1100 HV. De asemenea trebuie să se țină cont de diferențele fizice și chimice dintre oțel și aluminii care pot cauza corodarea îmbinării. Diferența de potențial electrochimic dintre fier și aluminii este 1,22V un factor ce arată susceptibilitatea mare la coroziune. În schimb această diferență de potențial dintre aluminii și zinc este de doar 0,899V [102].

Pentru a realiza o îmbinare corespunzătoare între aluminii și oțel trebuie ca faza intermetalică formată să aibă o grosime mai mică de 10  $\mu\text{m}$ . În cazul utilizării procedurii CMT această cerință poate fi îndeplinită prin alegerea corespunzătoare a parametrilor regimului de sudare care să conducă la o încălzire cât mai redusă a celor două materiale. Se precizează că datorită temperaturii mai reduse și utilizarea unui material de adaos din aliaj de aluminii, oțelul nu ajunge la temperatura de topire. Așadar în acest caz rezultă două tipuri diferite de îmbinare, aluminii se sudează, iar oțelul se sudobrazează.

## **4. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND SUDAREA/ÎMBINAREA OȚELURILOR ACOPERITE**

### **4.1. Îmbinarea prin sudobrazare MIG în curent pulsat a oțelurilor galvanizate**

#### **4.1.1. Materiale de bază utilizate**

Materialele de bază utilizate în experimentări sunt table din oțel S235 cu grosimea de 1,5 mm sau 2 mm, acoperite prin galvanizare cu zinc. Grosimea stratului de zinc este cuprinsă între 8-15  $\mu\text{m}$ .

Elaborarea probelor zincate în vederea efectuării experimentărilor s-a efectuat la firma Westmetal SRL Timișoara. Dimensiunea probelor a fost de 200x200 mm. În timpul realizării, respectând fluxul tehnologic prezentat în capitolul II s-a observat că sunt grosimi mai mari ale stratului de zinc în părțile laterale ale băii de galvanizare și mai mici în centru, datorită densității de curent diferită în baia de zincare.

#### **4.1.2 Materialele de adaos utilizate**

Materialele de adaos cele mai indicate pentru îmbinarea prin sudobrazare a oțelurilor galvanizate sunt sârmele electrod pe bază de cupru, așa cum este specificat în capitolul 3. Aceasta, deoarece temperatura de topire mai redusă a acestora contribuie la reducerea încălzirii materialului de bază în timpul procesului de îmbinare și prin aceasta se obține reducerea degradării stratului de protecție. Totodată prin utilizarea acestor materiale de adaos pe bază de cupru protecția anticorozivă a îmbinării este neafectată.

Sârmele de adaos alese pentru efectuarea cercetărilor experimentale au fost CuAl8 și CuSi3. În tabelele 4.1 respectiv 4.2 sunt prezentate compoziția chimică și proprietățile fizice ale sârmei CuAl8, iar în tabelele 4.3 și 4.4 compoziția chimică și proprietățile fizice ale sârmei CuSi3.

Material de adaos Cu Al8 este destinat pentru îmbinarea sau încărcarea prin sudare a materialelor de bronz de aluminiu, alamă, oțel și fontă. Totodată poate fi utilizat la îmbinarea prin sudobrazare a oțelurilor inoxidabile și a oțelurilor acoperite prin galvanizare. Îmbinarea prezintă o bună rezistență la coroziune și uzură.

Sârmă CuSi3 este folosită pentru sudarea cuprului, cupru-siliciu și aliajelor cupru-zinc. Sârma poate fi utilizată pentru sudarea oțelurilor cu cuprul și pentru încărcarea prin sudare a oțelului. Sârma CuSi3 prezintă rezistență la coroziune la temperaturi ridicate. Se recomandă, De asemenea sârma CuSi3 se recomandă pentru sudobrazarea oțelurilor galvanizate.

Tabelul 4.1 Compoziția chimică a sârmei CuAl8

Elemente de aliere	Al	Si	Mn	Ni	Zn	Pb	Fe	Altele
Compoziție chimică %	7,50 - 9,50	< 0,20	< 1,00	< 0,80	< 0,20	< 0,02	< 0,50	< 0,40

Tabelul 4.2 Proprietățile fizice ale sârmei CuAl8

Conductivitate electrică S*/mm <sup>2</sup>	Densitate kg/dm <sup>3</sup>	Temperatura Solidus °C	Temperatura Lichidus °C	Rezistență mecanică MPa	Elongația A5 Lo=5d0 %	Duritate HB
8	7,7	1030	1040	390 - 450	45	140

Tabelul 4.3 Compoziția chimică a sârmei CuSi3

Elemente de aliere	Al	Si	Mn	Sn	Zn	Pb	Fe	P	Altele
Compoziție chimică %	< 0,01	2,80 - 4,00	0,75 - 1,50	< 0,20	< 0,20	< 0,02	< 0,30	< 0,02	< 0,40

Tabelul 4.4 Proprietățile fizice ale sârmei CuSi3

Conductivitate electrică S*/mm <sup>2</sup>	Densitate kg/dm <sup>3</sup>	Temperatura Solidus °C	Temperatura Lichidus °C	Rezistență mecanică MPa	Elongația A5 Lo=5d0 %	Duritate HB
3 - 4	8,5	910	1025	330 - 370	40	80 - 90

Așa cum se observă din analiza proprietăților fizice ale celor două materiale de adaos sârma CuAl8 prezintă caracteristici superioare de rezistență mecanică și duritate comparativ cu sârma din CuSi3. Temperatura de topire a celor două materiale este apropiată ca valoare, în schimb este mult mai mică față de temperatura de topire a oțelului ceea ce le recomandă pentru utilizarea lor la sudobrazarea oțelurilor galvanizate.

Gazul de protecție recomandat este argonul sau amestecuri de argon cu 1-3%CO<sub>2</sub>, sau 1%O<sub>2</sub>. Prin introducerea acestor gaze oxidante în argon s-a constatat o îmbunătățire a stabilității arcului precum și un aspect estetic a îmbinării.

Ca urmare, în cazul îmbinării cu sârma de CuAl8 gazul de protecție utilizat a fost argon, iar în cazul sârmei CuSi3 s-a folosit amestecul de gaz Ar+2,5% CO<sub>2</sub>.

#### 4.1.3 Echipamentul utilizat

La realizarea probelor experimentale s-a utilizat echipamentul de sudare MIG/MAG –PHOENIX 300 produs de firma EWM Hightech Welding. Echipamentul are în componența sa: sursa cu inverter, microprocesorul pentru programe, dispozitivul de avans sârmă cu 4 role, încorporat în echipament, pistol de sudare MIG răcit cu gaz.

Echipamentul lucrează în regim sinergic, microprocesorul calculând parametrii optimi pentru datele de intrare.

Procedura de lucru constă în selectarea procedurii de sudare, a materialului sârmei electrod, a gazului de protecție și a diametrului sârmei electrod. În timpul procesului se face corecția tensiunii arcului, calculată de microprocesor și a inductanței fictive calculată de asemenea de microprocesor.

#### 4.1.4 Probe experimentale

##### 4.1.4.1 Probe experimentale realizate cu sârma CuAl8

Pentru primele încercări experimentale s-a ales ca materiale de sudare: sârma de bronz de aluminiu CuAl8 cu diametrul de 1mm, iar ca și gaz de protecție argon.

La alegerea regimului de sudare s-au stabilit ca date de intrare: procedeul de îmbinare prin sudobrazare, materialul sârmei electrod CuAl8, gazul de protecție argon și diametrul sârmei electrod de 1 mm rezultând condițiile de realizare a îmbinării sudobrazate, prezentate în tabelul 4.5.

Tabelul 4.5. Date de intrare pentru stabilirea parametrilor de sudobrazare

Debitul de gaz l/min	Marca sârmei	Grosimea materialului de bază mm	Poziția pistolului față de verticală	Viteza de sudobrazare cm/min	Gaz de protecție
12	CuAl8	1,5	10-20°	50-70	argon

În timpul executării probelor experimentale s-a oscilografiat arcul electric. Oscilogramele din figura 4.1 sunt ridicate pentru stabilirea corespunzătoare a parametrilor de sudobrazare. S-au făcut corecții de tensiune și corecția inductanței fictive, prin care s-a urmărit deteriorarea cât mai redusă a stratului de zinc, de pe suprafața oțelului. Tabelul 4.6 prezintă parametrii de sudobrazare obținuți, utilizați la realizarea probelor experimentale.

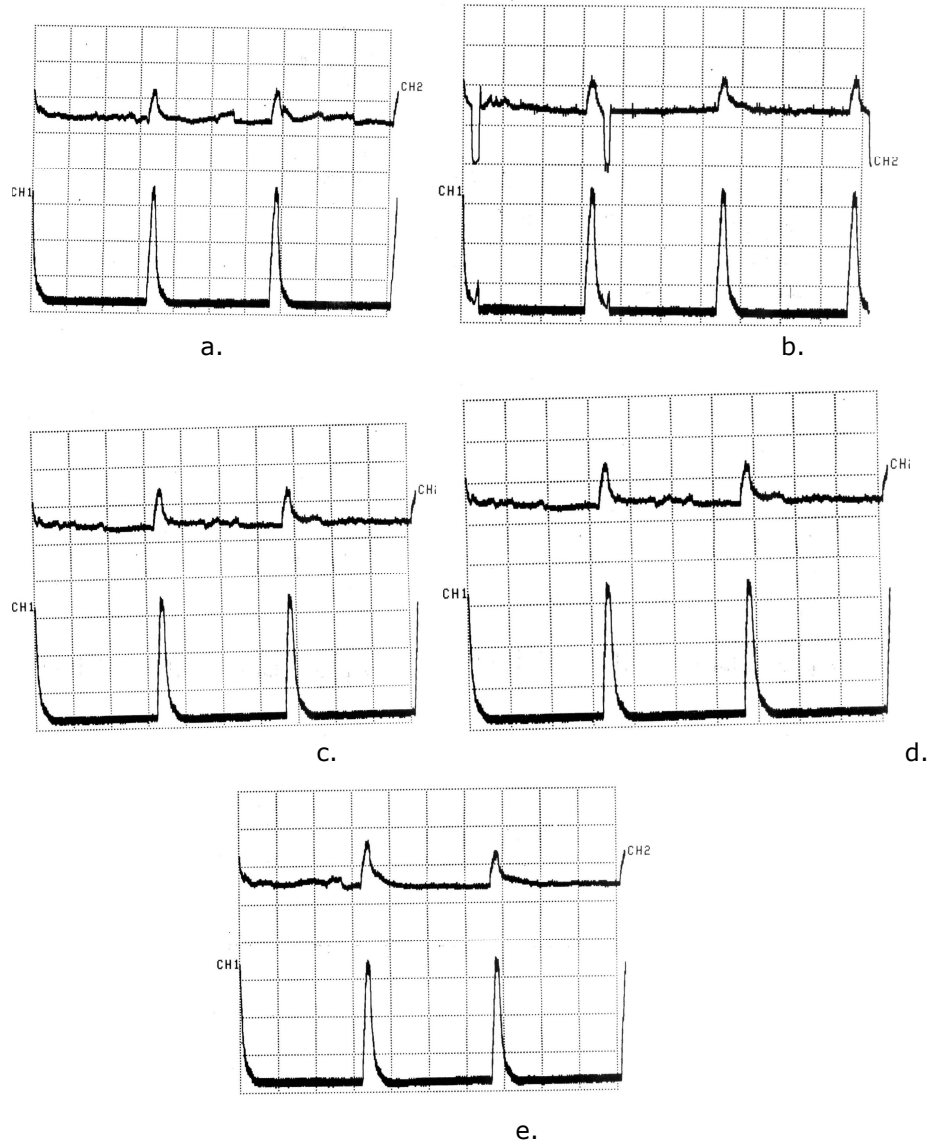


Fig.4.1. Oscilogramme ale arcului, la sudobrazarea în curent pulsant MIG, utilizând sârma de CuAl8 și gaz de protecție argon, ,  
 $t=10\text{ms/cm}$ ,  $U_a=10\text{V/cm}$ ,  $I_s=100\text{A/cm}$



Tabelul 4.6 Parametrii de sudobrazare MIG utilizând sârma de adaos CuAl8

Varianta de sudobrazare	Curentul de sudobrazare [A]	Tensiunea arcului [V]	Corecția de tensiune [V]	Dinamica arcului
Var AI (4.1a)	54	16,5	-3	+3
Var AII (4.2b)	53	15,5	-3	+2
VarA III (4.3c)	57	16,4	-2	+2
Var AIV (4.4d)	73	14,3	-3	+3
Var AV (4.5e)	54	17,7	-2	+3

#### 4.1.4.2 Probe experimentale realizate cu sârma CuSi3

Probele experimentale realizate în etapa următoare a cercetărilor s-au ales modificat materialele de sudare. Materiale de sudare au fost: sârma electrod din bronz de siliciu CuSi3 cu diametrul de 1mm, iar ca și gaz de protecție Ar+2,5%CO<sub>2</sub>.

S-a folosit același echipament de sudare pentru care s-au setat datele de intrare, înserate în tabelul 4.7. S-au efectuat mai multe încercări experimentale făcându-se corecții ale tensiunii arcului și corecții ale inductanței fictive pentru obținerea unei îmbinări corespunzătoare rezultate în urma inspecției vizuale.

S-a urmărit deteriorarea cât mai redusă a stratului de zinc.

Tabelul 4.7 Date de intrare pentru echipamentul MIG/MAG Pheonix 300

Gazul de protecție	Marca sârmei electrod	Procedeeul de îmbinare	Diametrul sârmei electrod mm	Felul curentului	Grosime material de bază mm
Ar+2,5%CO <sub>2</sub>	CuSi3	sudobrazare	1	Curent pulsat	1,5

Pentru stabilirea parametrilor de sudobrazare s-a plecat de la recomandările date de firma EWM Hightech Welding privind îmbinarea tablelor zincate prin procedeul de sudobrazare (tabelul 4.8).

Tabelul 4.8. Parametrii de sudobrazare după recomandările EWM

Grosime piesă mm	1	1,5	2	3
Tensiunea arcului V	16	17	18	19
Curentul de sudare A	25	45	65	90
Frecvența pulsului Hz	20	35	60	80
Durata pulsului ms	1,5	1,6	1,7	1,7
Viteza de avans sârmă m/min	2	3	4,5	6

Parametri de îmbinare înserați în tabelul 4.8 sunt valabili în condițiile prezentate în tabelul 4.9

Tabelul 4.9. Condiții de realizare a îmbinării tablelor zincate prin sudobrazare

Gaz de protecție	Debit gaz de protecție l/min	Marca sârmei electrod	Înclinarea pistolului față de verticală	Viteza de sudobrazare cm/min	Poziția de sudare
argon	12	CuSi3	10-20°	50-70	suprapunere

În urma experimentării efectuate au reieșit mai multe variante de luat în considerare, pentru potențiala optimizare a parametrilor de sudobrazare a tablelor galvanizate. Astfel în tabelul 4.10 sunt trecuți parametrii obținuți în urma încercărilor experimentale efectuate pe table galvanizate. Pentru cazurile încercate, în funcție de grosimea tablei s-a stabilit viteza de avans a sârmei și s-au modificat corecția de tensiune și dinamica arcului, pentru a analiza influența acestora asupra geometriei îmbinării.

Datele prezentate în tabelul 4.8 sunt obținute pentru varianta tehnologică de îmbinare folosind suport de cupru la rădăcina.

Această măsură tehnologică este necesară în scopul asigurării unei temporizări a răcirii care are ca finalitate păstrarea nedegradată a stratului protector.

Tabelul 4.10 Parametrii de sudobrazare mecanizată MIG utilizând sârma CuSi3

Proba	Curentul de sudobrazare A	Tensiune arc V	Viteza de avans sârmă m/min	Lungimea capătului liber mm	Viteza de sudobrazare cm/min	Corecția de tensiune V	Dinamica arcului	Grosime tablă mm	Debit gaz de protecție l/min
CI	58-64	15,8-16,2	3	12	50-55	-2	+3	1,5	12
CII	50-57	17,9-18,3	3	17	50-55	-1	+3	1,5	16
CIII	51-55	18,9-19,1	3	12	50-55	0	+3	1,5	16
CIV	67-70	19,5-19,7	3,5	14	50-55	1	0	2	16
CV	70-73	20,4-20,6	3,5	14	50-55	+2	-2	2	16
CVI	68-71	21,6-21,8	3,5	14	50-55	+3	-2	2	16

Micșorarea zonei în care zincul este deteriorat este necesar să se încălzească cât mai puțin piesele. Acest deziderat se poate realiza prin mărirea vitezei de sudobrazare sau prin răcirea pieselor ce se sudează, cu ajutorul suportului de cupru la rădăcină. Ambele variante au fost luate în considerare la obținerea parametrilor

#### 4.1 – Îmbinarea prin sudobrazare MIG în curent pulsat a oțelurilor galvanizate 83

din tabelul 4.10. Astfel s-a sudat cu o viteză de sudobrazare mare folosind un sistem mecanizat de sudare și de asemenea s-a folosit un suport de cupru la rădăcină.

Ulterior s-au realizat și îmbinări prin sudobrazare manuală MIG în curent pulsat asigurând o temporizare a răcirii folosind suport de cupru la rădăcină. În acest caz se poate observa că viteza de sudobrazare este mai redusă comparativ cu sudobrazarea mecanizată și prin aceasta energia liniară introdusă în material este mai mare, ceea ce conduce la o deteriorare pe o suprafață mai mare a stratului de zinc. Parametri utilizați în cazul sudobrazării manuale sunt prezentați în tabelul 4.11.

Tabelul 4.11 Parametrii de sudobrazare manuală MIG utilizând sârma CuSi3

Proba	Curentul de sudobrazare A	Tensiune arc V	Viteza de avans sârma m/min	Lungimea capătului liber mm	Viteza de sudobrazare cm/min	Corecția tensiune V	Dinamica arcului	Grosime tablă mm	Debit gaz de protecție l/min
MI	92	21,2	4,5	16	30-35	+1,5	0	2	18
MII	83	21,8	4,5	16	30-35	+1,5	0	2	18

#### 4.1.5 Încercarea îmbinărilor realizate

Probele experimentale au fost supuse unui program specific și complex de încercări prin care s-au urmărit evidențierea oportunității de utilizare a procedurii de sudobrazare MIG în curent pulsat la realizarea îmbinărilor din oțel galvanizat.

##### 4.1.5.1 Încercarea îmbinărilor realizate cu sârma CuAl8

Defectele din materialul de bază sunt primele care cauzează defecte în îmbinare. Materialul galvanizat este un oțel de uz general, S235. De specificat că defectele menționate au fost observate la macro și analiza microstructurală a probelor îmbinate.

Alte defecte care se pot întâlni în materialul de bază sunt cele legate de grosimea stratului de zinc care poate să varieze sau în unele cazuri stratul de zinc poate fi întrerupt. În figura 4.2 a, b se pot observa diferențe de grosime ale stratului de zinc, iar în figura 4.2 c stratul de zinc este întrerupt .

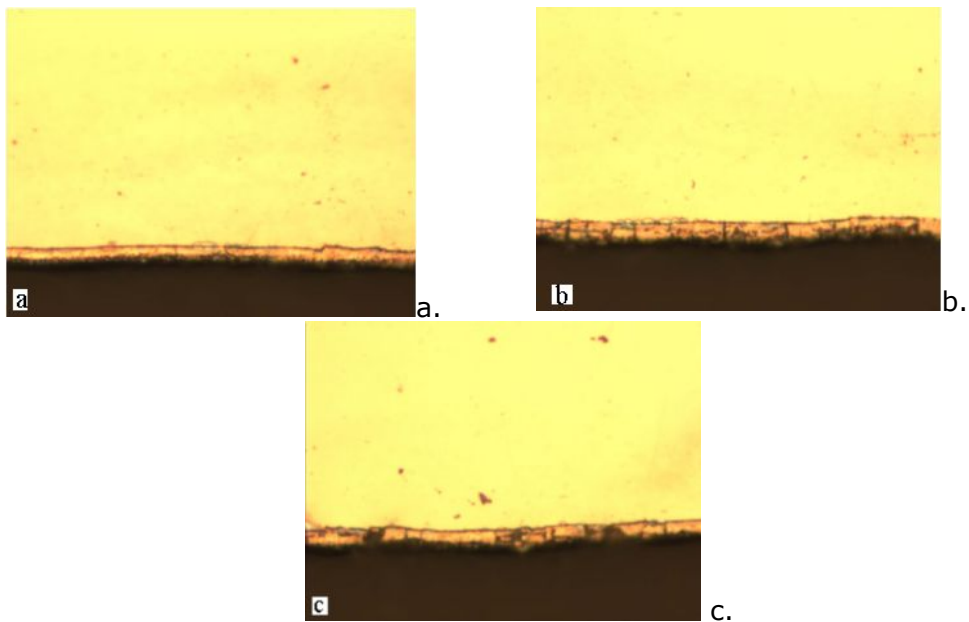


Fig. 4.2: Imagini ale stratul de zinc MO 500 x

a, b – grosime variabilă, c- întreruperi ale stratului de zinc

a. *Măsurarea stratului de zinc*

Folosind un soft specializat s-au putut efectua măsurători ale stratului de zinc așa cum se poate observa din figura 4.3. Rezultatele acestor măsurători sunt date în tabelul 4.12

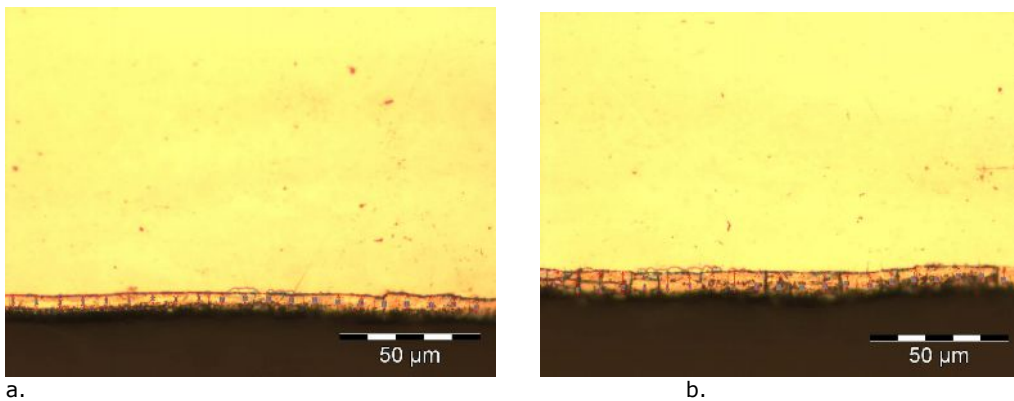


Fig. 4.3. Imagini privind măsurarea stratului de zinc MO 500x

## 4.1 – Îmbinarea prin sudobrazare MIG în curent pulsat a oțelurilor galvanizate 85

Tabelul 4.12 Grosimea stratului de zinc

Nr. măsurării	Grosimea stratului a $\mu\text{m}$	Nr măsurării	Grosimea stratului b $\mu\text{m}$
1	4.12	1	7.18
2	4.69	2	8.76
3	4.41	3	8.39
4	4.28	4	7.81
5	3.41	5	7.09
6	4.79	6	6.47
7	3.61	7	5.87
8	4.81	8	6.59
9	3.84	9	7.80
10	4.44	10	7.00
11	3.75	11	7.18
12	3.46	12	7.51
13	3.76	13	6.81
14	4.49	14	5.83
15	4.66	15	6.16
16	4.55	16	5.97
17	4.49	17	6.26
18	5.46	18	6.58
19	5.45	19	5.13
20	5.00	20	5.44
21	4.95	21	5.83
Valoare medie	4.40		6.75
Valoare minima	3.41		5.13
Valoare maxima	5.46		8.76

Tabelul 4.13 Grosimea stratului de zinc și a stratului de oxid

Nr. măsurării	Grosimea stratului de Zn „a” μm	Grosimea stratului de oxid „b” μm	Grosimea stratului de Zn „c” μm	Grosimea stratului de oxid „c” μm	Grosime ambele straturi „c” μm
1	7.18	8.43	11.19	7.15	18.34
2	6.88	8.06	8.43	10.37	18.80
3	9.63	6.76	11.08	6.94	18.02
4	10.84	8.36	10.93	7.14	18.07
5	10.43	8.70	10.48	8.04	18.51
6	9.62	5.79	10.42	8.78	19.19
7	10.92	6.25	11.24	7.09	18.34
8	10.24	8.07	10.47	7.24	17.71
9	10.36	8.59	10.10	8.36	18.46
10	9.81	8.30	8.83	8.56	17.39
11	9.11	8.79	8.29	8.80	17.08
12	8.98	8.44	10.14	6.57	16.71
13	9.43	7.62	9.64	7.50	17.13
14	9.52	8.88	8.87	9.00	17.87
15	8.90	9.53	9.42	8.36	17.78
16	9.06	10.03	9.27	9.30	18.57
17	8.03	10.69	8.73	9.51	18.24
18	10.50	7.63	10.61	5.82	16.43
19	9.17	6.06	9.79	6.94	16.73
20	9.97	8.14	9.57	8.12	17.69
21	10.03	6.98	8.90	6.60	15.50
Valoare medie	9.46	8.10	9.83	7.91	17.74
Valoare minima	6.88	5.79	8.29	5.82	15.50
Valoare maxima	10.92	10.69	11.24	10.37	19.19

b. Analiza macro și microstructurală a îmbinării sudobrazate cu sârma CuAl8

Principala încercare a îmbinărilor realizate cu sârma CuAl8 a constat în examinări macro și microstructurale conform standardului SR EN 1321:2000.

Analizele macro și microstructurale au urmărit analizarea materialului de bază. Aceasta deoarece defectele ce apar la îmbinarea oțelurilor galvanizate sunt cauzate de mai mulți factori:

- pregătirea necorespunzătoare a componentelor;

- alegerea incorectă a parametrilor de sudobrazare;
- materialele de adaos utilizate;
- defectele din materialul de bază.

De menționat faptul că datorită stratului de zinc îmbinarea acestor componente este mai dificil de realizat față de îmbinarea tablelor neacoperite.

Continuitatea și uniformitatea stratului de zinc este una din condițiile de calitate a oțelurilor acoperite sau a îmbinărilor acestora. În această idee importantă a fost măsurarea stratului de zinc urmărindu-se dacă acestea sunt uniforme și fără întreruperi.

Analiza macrostructurală a îmbinărilor realizate prin sudobrazare MIG în curent pulsat, cu sârma CuAl8, conform SR EN 1321:2000, a urmărit evidențierea defectelor de tipul porilor, inclusiv uniformitatea, continuitatea sau dezincarea stratului de zinc.

Principalele defecte care pot apărea la sudobrazare MIG în curent pulsat sunt suflurile deoarece stratul de zinc este topit de pe suprafața ce se îmbină și rămâne prins în îmbinare (figura 4.4).

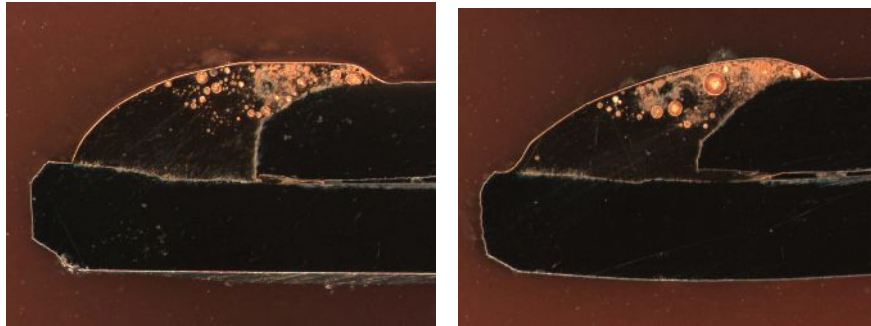


Fig. 4.4 Imagine macroscopică a îmbinării sudobrazate MIG în curent pulsat

Pentru observarea microstructurii îmbinării, precum și a zonei influențată termic piesa a fost atacată cu nital 10 pentru oțel și cu clorură ferică, 1 parte  $\text{FeCl}_3$ , 8 părți  $\text{H}_2\text{O}_2$  pentru a observa structura de cupru. Examinarea s-a făcut cu ajutorul microscopului optic OLYMPUS Bx51M.

După zincare stratul a fost supus unui proces de pasivare. Stratul de oxid astfel rezultat este prezentat în figura 4.5

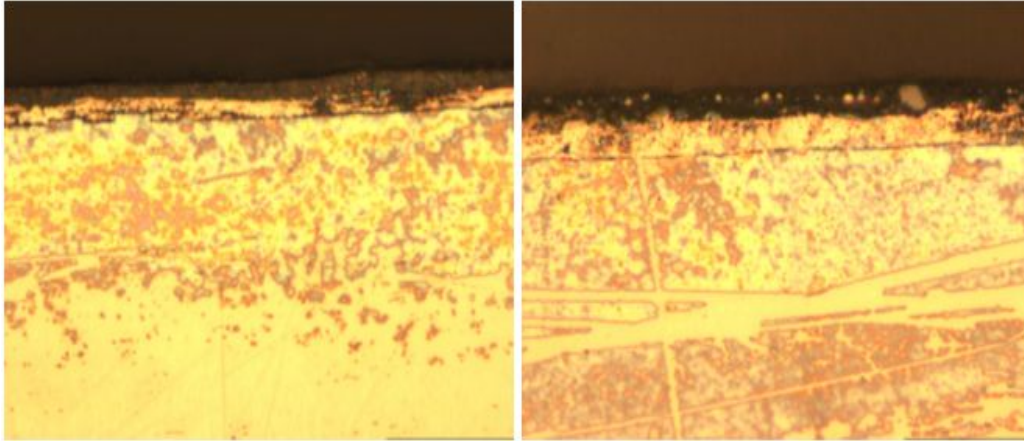


Fig. 4.5 Imagini ale stratului pasivat MO 500x

Cum se poate observa din figura 4.5 grosimea stratului de zinc și a stratului de oxid poate fi neuniformă. Rezultatele măsurării acestor straturi este prezentată în tabelul 4.13, conform figurii 4.6.

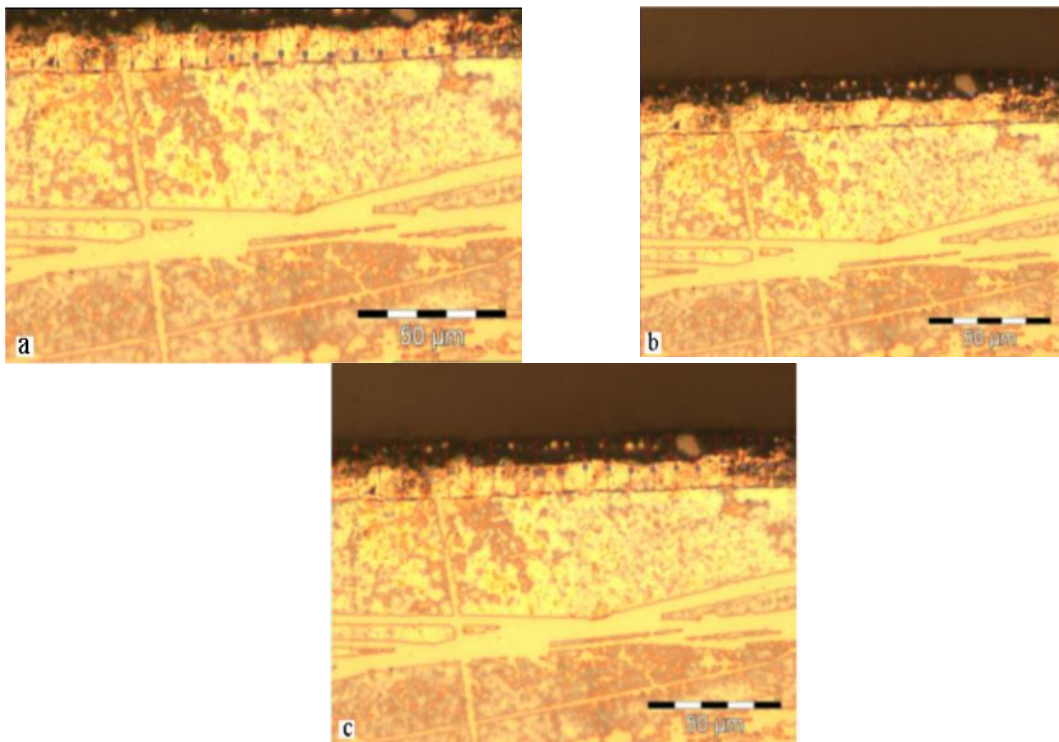


Fig. 4.6 Imagini folosite pentru măsurarea straturilor de zinc și oxid  
a- măsurarea stratului de zinc, b- măsurarea stratului de oxid, c- măsurarea ambelor straturi



Precum se observă din datele prezentate anterior exista variații de grosime ale straturilor de zinc și de oxid. În mod obișnuit stratul de zinc este mai gros decât stratul de oxid însă pot exista porțiuni în care stratul de oxid este mai gros (figura 4.7) sau porțiuni în care lipsește stratul de zinc sau de oxid.



Fig 4.7 Evidențierea diferenței de grosime dintre stratul de Zn și oxid MO 500x

În figura 4.8 se prezintă zona influențată termic a îmbinării sudobrazate MIG. La nivel microscopic se remarcă în zona influențată termic modificarea structurii materialului de bază. În vecinătatea îmbinării apare o subzonă de supraîncălzire, caracterizată printr-o granulație grosieră, datorită creșterii grăunților de austenită la încălzire. La o distanțare de îmbinare se constată prezența unei subzone de normalizare, caracterizată printr-o granulație fină.

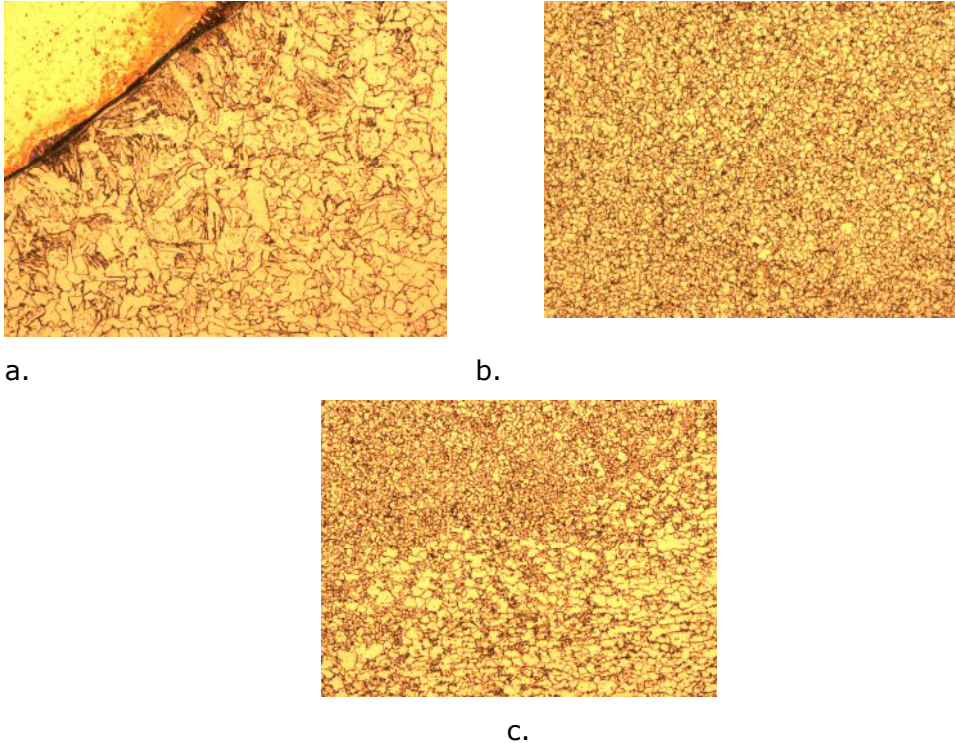


Fig. 4.8: Zona influențată termic MO 200x

- a. Subzona de supraîncălzire, b. subzona de normalizare, c. subzona transformărilor incomplete

Urmare a examinărilor microstructurale, principalele defecte care s-au întâlnit sunt defecte de tipul porilor. În figura 4.9 sunt prezentate defecte de acest tip localizate mai ales la suprafața îmbinării, dar pot apărea și în interiorul îmbinării.

Un aspect important este cel legat de deteriorarea stratului de zinc de la suprafața îmbinării în urma evaporării zincului. În jurul îmbinării stratul anticoroziv este de obicei distrus. La tablele subțiri acest aspect este valabil și pentru partea opusă a îmbinării. Dacă zonele afectate sunt înguste sub 2-3mm, nu este necesară repararea lor, pentru că zincul din zonele învecinate având o activitate mai ridicată protejează chimic oțelul mai puțin activ, prin efect catodic. Dacă zona afectată este mai largă atunci aceasta împreună cu sudura trebuie din nou acoperită cu zinc.

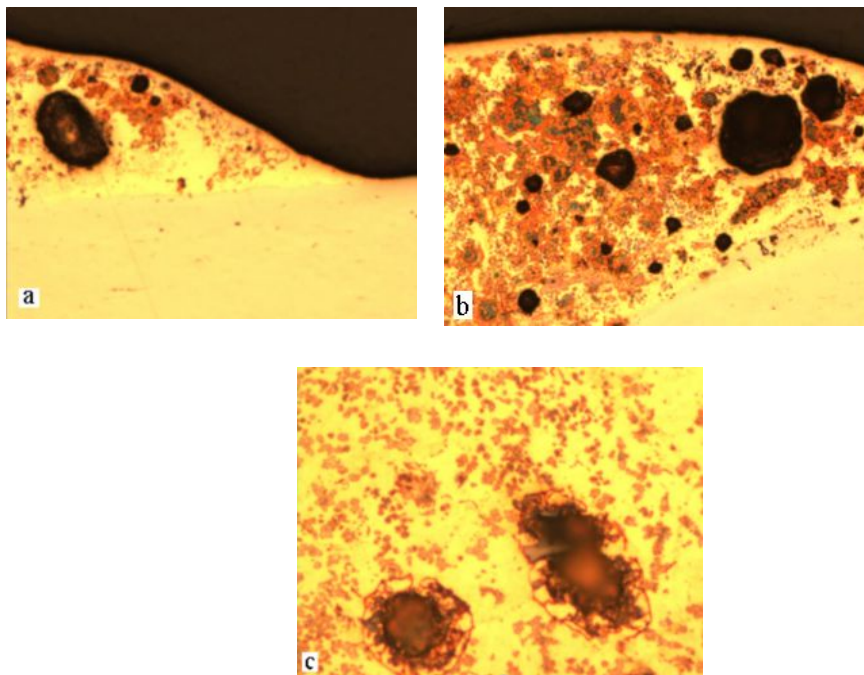


Fig. 4.9 Pori în îmbinare MO 200x  
a, b – la suprafața îmbinării, c – în interiorul îmbinării

În figura 4.10 se prezintă o îmbinare realizată prin procedeul de sudobrazare MIG în curent pulsat la care stratul de zinc este deteriorat.

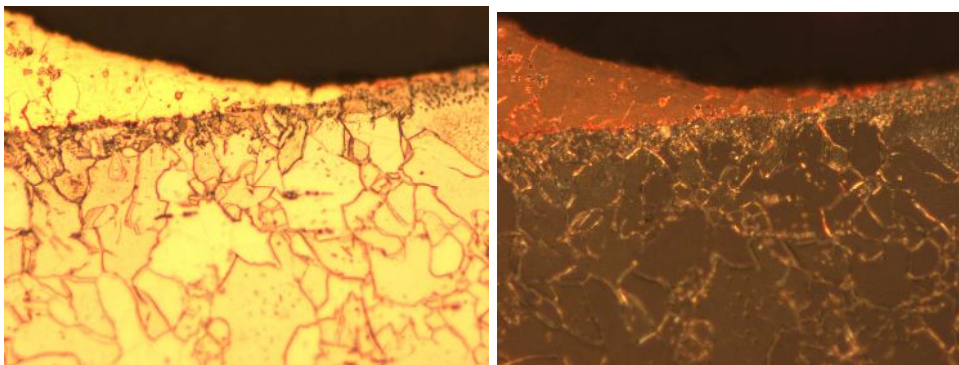


Fig. 4.10: Imagine microscopică a suprafeței îmbinării MO 500 x

Defectele ce apar la îmbinarea oțelurilor galvanizate sunt cauzate de defectele de la nivelul materialului de bază, dar și de alegerea necorespunzătoare a materialelor de adaos. Din această cauză s-au ales alte materiale de adaos pentru încercările ulterioare. Astfel s-a ales sârma de CuSi3 și gazul de protecție Ar+2,5%CO<sub>2</sub>.

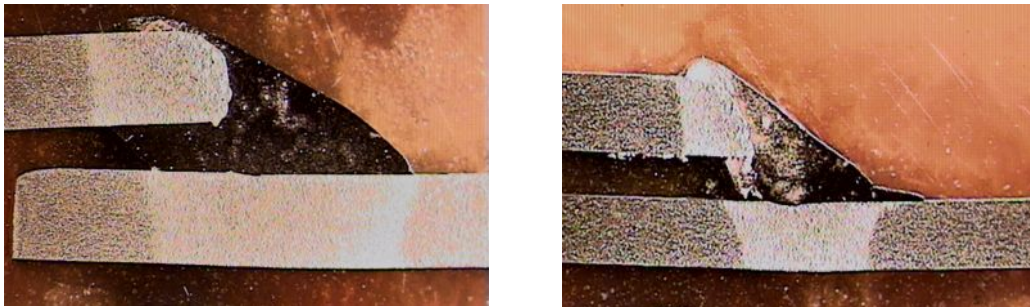
#### 4.1.5.2 Încercarea îmbinărilor realizate cu sârma CuSi3

Încercarea îmbinărilor realizate s-au efectuat pentru cele două variante de îmbinare prin sudobrazare mecanizată respectiv sudobrazare manuală utilizând materialele de adaos: sârma CuSi3 și gazul de protecție Ar+2,5%CO<sub>2</sub>.

Îmbinările astfel obținute au fost supuse analizei macro și microscopice conform SR EN 1321:2000, cu ajutorul microscopului OLYMPUS CX41 la mărimi cuprinse între 50-500x, precum și încercărilor de microdurate cu ajutorul microdurimetruului PMT3, conform SR EN 1043-1:1997.

##### a. Analiza macro și microstructurală a îmbinărilor sudobrazate cu sârma CuSi3

Imaginea macroscopică a îmbinărilor obținute prin sudobrazare relevă apariția unei zone influențate termic în materialul de bază, figura 4.11. Această zonă influențată termic este mult mai extinsă în cazul variantei manuale, figura 4.11.a, decât în cazul variantei mecanizate, figura 4.11.b. Pentru a evidenția microstructura metalului de bază în zonei influențată termic piesa a fost atacată cu nital 10, iar pentru analiza microscopică a îmbinării din cupru s-a folosit atacul metalografic cu clorură ferică, 1 parte FeCl<sub>3</sub>, 8 părți H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.



a.

b.

Fig. 4.11 Imaginea macroscopică a îmbinărilor sudobrazate  
a. sudobrazare manuală, b. sudobrazare mecanizată

La nivel microscopic, analiza efectuată în conformitate cu SR EN 1321:2000, în zona influențată termic se remarcă modificarea structurii materialului de bază și afectarea stratului superficial, prin dezincarea parțială acestuia.

Structura inițială a materialului de bază este o structură feritică, cu grăunți cristalini alungiți, ca urmare a procesului de deformare plastică la care a fost supus, figura 4.12. Se remarcă de asemenea și stratul de acoperire rezultat în urma zincării, compact și uniform din punct de vedere geometric, ce apare închis în imaginea microscopică.

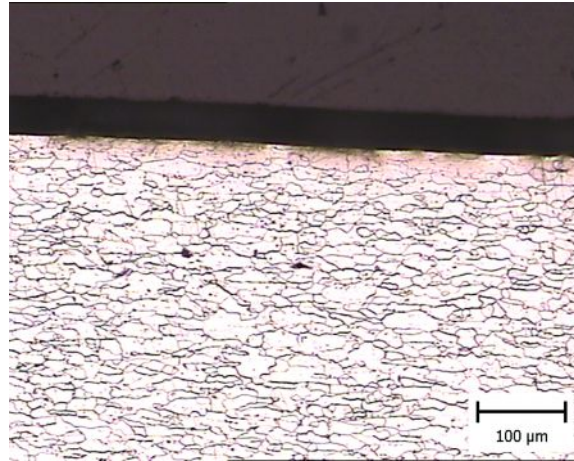


Fig. 4.12 Microstructura materialului de bază

În zona influențată termic, în vecinătatea îmbinării obținute prin lipire tare, apare o structură caracterizată printr-o granulație grosieră, datorată creșterii grăunților de austenită la încălzire. Ca urmare a faptului că răcirea s-a făcut rapid, structura are și un caracter Widmanstätten, figura 4.13.

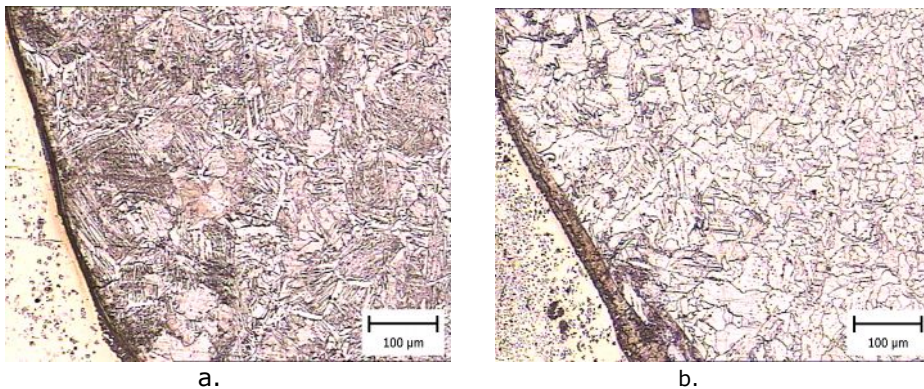
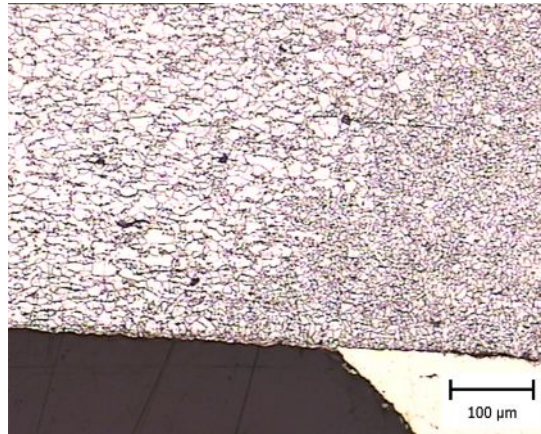


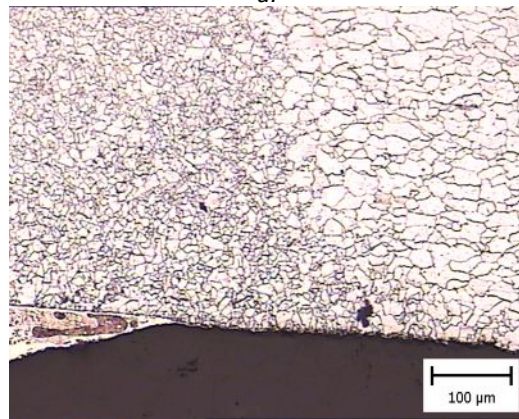
Fig. 4.13 Structura Widmanstätten din ZIT  
a. sudobrazare manuală, b. sudobrazare mecanizată

Se remarcă faptul că în cazul sudobrazării mecanizate, figura 4.13.b, zona cu structură tip Widmanstätten este mult mai îngustă, iar granulația este mai fină decât în cazul sudobrazării manuale, figura 4.13.a.

La o distanțare de îmbinare, se constată prezența unei regiuni a zonei influențate termic, caracterizată printr-o granulație fină, ce nu a suferit o creștere a grăunților prin supraîncălzire, figura 4.14. Se observă de asemenea și dispariția parțială a stratului de protecție din zona adiacentă îmbinării.



*a.*



*b.*

Fig. 4.14 Regiunea din ZIT cu granulație fină  
a. sudobrazare manuală, b. sudobrazare mecanizată

Pentru analiza structurală a acestei îmbinări se apelează la diagrama de echilibru Cu-Si, figura 4.15.

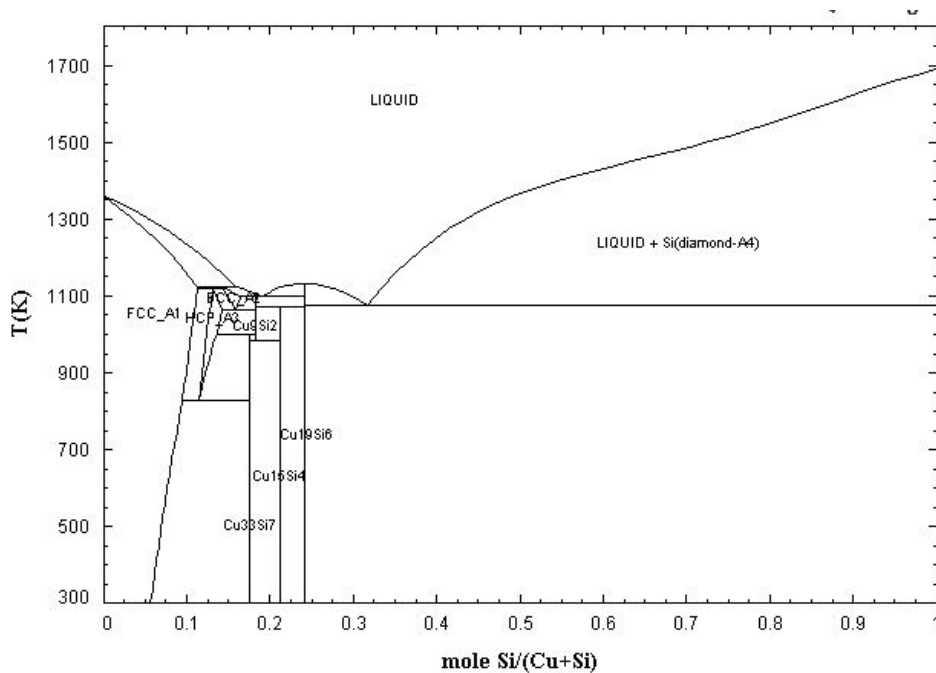
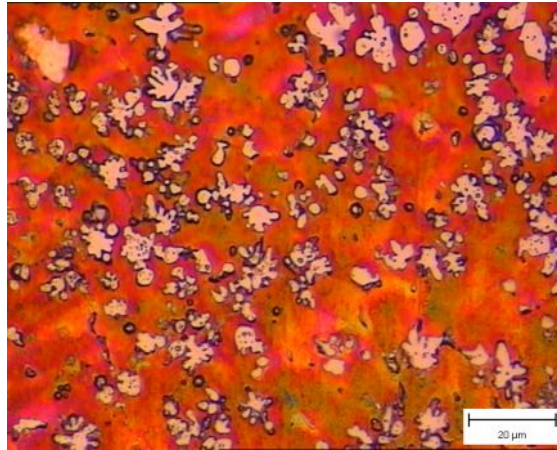


Fig. 4.15 Diagrama de echilibru fazic Cu-Si

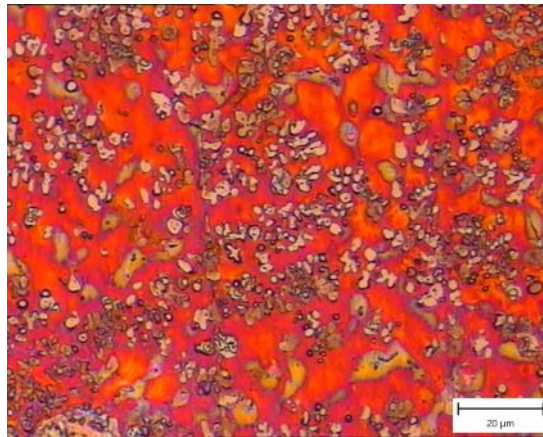
Se constată că sistemului Cu-Si prezintă reacții peritectice, eutectice și eutectoide, care conduc la apariția în structura aliajelor la temperatura ambiantă a unor compuși intermetalici, ex.  $\text{Cu}_{33}\text{Si}_7$ ,  $\text{Cu}_{15}\text{Si}_4$ ,  $\text{Cu}_{19}\text{Si}_6$ , care le conferă rezistență, duritate, dar și o tenacitate scăzută. De altfel, în practică nu se utilizează aliaje cu un conținut mai mare de 5% Si, datorită fragilității lor ridicate.

Aliajul de sudobrazare utilizat este  $\text{CuSi}_3$ , care prezintă o structură formată dintr-o soluție solidă  $\alpha$  de siliciu dizolvat în cupru, ce cristalizează în sistemul cubic cu fețe centrate și un amestec mecanic eutectoid format din fazele  $\alpha$  și compusul intermetalic  $\text{Cu}_{33}\text{Si}_7$ . Această structură este prezentă și în imbinarea sudobrazată, figura 4.16.

Se remarcă cristalizarea dendritică a eutectoidului într-o matrice de soluție solidă  $\alpha$ , precum și faptul că în cazul sudobrazării mecanizate, figura 4.16. b, structura este mai fină decât în cazul sudobrazării manuale, figura 4.16.a.



a.



b.

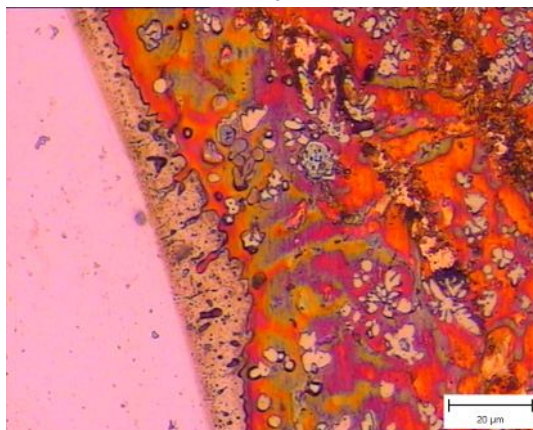
Fig. 4.16 Microstructura îmbinării obținute prin sudobrazare  
a. sudobrazare manuală, b. sudobrazare mecanizată

De remarcat faptul că apare și o zonă de difuzie a cuprului în materialul de bază, zonă mult mai extinsă în cazul sudobrazării manuale, figura 4.17. Prezența acestei zone de difuzie în materialul de bază asigură o bună legătură între aliajul pentru sudobrazare și metalul de bază, contribuind la mărirea rezistenței îmbinării sudobrazate.





a.



b.

Fig. 4.17 Zona de difuzie în materialul de bază  
a. sudobrazare manuală, b. sudobrazare mecanizată

b. *Încercări de microduritate a îmbinărilor sudobrazate realizate cu sârma CuSi3*

Încercările de microduritate s-au efectuat conform SR EN 1043-1: 1997 după metoda Vickers, utilizând sarcina de 5 kgf, pe probe examinate metalografic.

În tabelul 4.14 sunt indicate valorile microdurităților, pentru variantele de sudobrazare MIG, mecanizată și manuala cu specificarea distanței față de axa îmbinării, iar în figura 4.18 reprezentarea grafică a datelor astfel obținute.

Tabel 4.14 Valorile durității HV5

Distanța față de axa îmbinării mm	Varianta de imbinare prin sudobrazare mecanizată	Varianta de imbinare prin sudobrazare manuală
1	159	148.3
2	152	131.1
3	143.7	120
4	146	115.8
5	136.1	117.4
6	133	113.4
7	137.2	112.6
8	134	112

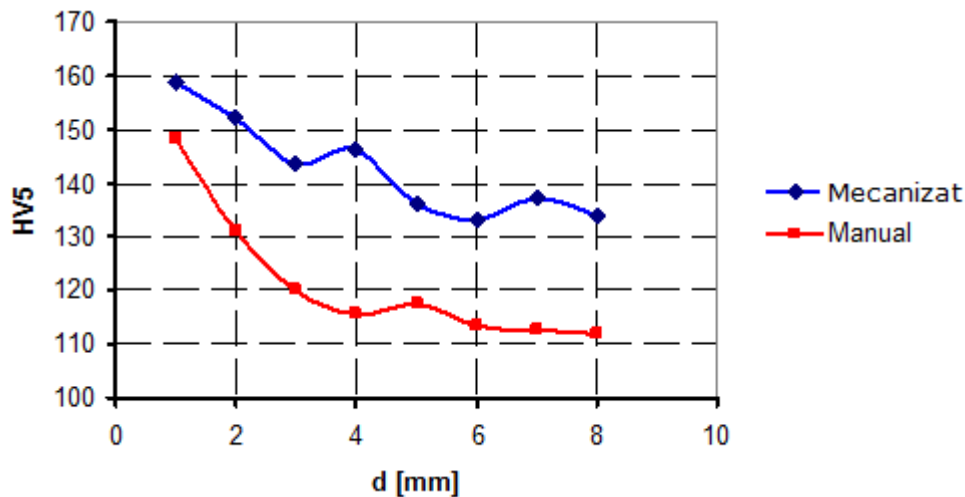


Fig. 4.18 Determinări de duritate

Urmărind variația durității în materialul de bază cu lungimea măsurată din axa îmbinării, se constată o duritate ridicată în zona influențată termic, corespunzătoare structurii Widmanstätten. Pe măsură ce ne îndepărtăm de axa îmbinării duritatea scade, confirmând morfologia materialului de bază evidențiată prin analiză metalografică. De asemenea se remarcă faptul că în cazul sudobrazării mecanizate, duritatea materialului de bază este mai mare, deoarece încălzirea materialului s-a produs pe o zonă mai mică, iar răcirea este mai rapidă, structura rezultată fiind mai fină.

Datorită defectelor care au fost evidențiate la sudobrazarea MIG în curent pulsant a oțelurilor galvanizate s-a optat pentru următoarele încercări la alegerea procedurii de îmbinare prin sudobrazare cu aport scăzut de căldură, MIG-CMT, tocmai datorită energiei liniare mici, deci a căldurii introdusă în piesă.

## **4.2 Îmbinarea prin sudobrazare cu aport termic scăzut, MIG-CMT**

### **4.2.1. Materiale de bază utilizate**

Materialele de bază utilizate în experimentări sunt table din oțel S235 cu grosimea de 1,00 respectiv 1,5 mm, acoperite prin galvanizare cu zinc. Fluxul tehnologic precum și parametri utilizați la elaborarea acestor materiale, sunt indicați în subcapitolul 4.1. Grosimea stratului de zinc este cuprinsă între 8-15 μm.

### **4.2.2. Materiale de adaos utilizate**

Materialele de adaos folosite sunt sârma din CuSi3 având compoziția chimică și proprietățile fizice prezentate în tabelele 4.3 respectiv 4.4 și gazul de protecție utilizat este argon în cazul sudobrazării manuale și Ar+30%He+1%CO<sub>2</sub> în cazul sudobrazării mecanizate.

Introducerea heliului în gazul de protecție crește puterea arcului, datorită potențialului de ionizare ridicat al acestuia, permițând astfel creșterea vitezei de sudare și obținerea unor proprietăți mecanice corespunzătoare ale îmbinării.

S-a optat pentru acest gaz pentru a permite creșterea puterii arcului și prin aceasta creșterea vitezei de sudobrazare la aproximativ 2m/min. Motivul pentru care se optează pentru o viteză de sudare mare este acela de a deteriora cât mai puțin stratul de zinc.

### **4.2.3 Echipamentul utilizat**

Echipamentul de sudare utilizat este Trans Puls Synergic 2700 CMT produs de firma Fronius. Materialul de adaos sub formă de sârmă este antrenat printr-un sistem de role. DAS și introdus în arzător prin intermediul pachetului de furtunuri. Deoarece sârma din cupru este mai moale decât sârma de oțel se impune să se utilizeze un dispozitiv de avans sârmă format din patru role. De menționat că în acest caz canalul rolor trebuie adaptat la diametrul materialului de adaos, acestea având o formă semicirculară. Furtunurile de alimentare trebuie să fie din teflon pentru a asigura o rezistență minimă la alunecare. De asemenea pachetul de furtunuri nu trebuie să fie mai lung de 3m. Alimentarea se face în condiții excelente la sistemul de alimentare „push-pull”. Pentru o funcționare îndelungată se recomandă folosirea unui pistol răcit cu apă.

### **4.2.4. Probe experimentale**

#### ***4.2.4.1 Sudobrazarea MIG-CMT în variantă mecanizată***

La sudobrazarea MIG-CMT, se folosește tehnologia desprinderii asistate a picăturii. În cazul acestui procedeu de sudare, dacă parametrii tehnologici de sudare au fost corect aleși, ar trebui ca la fiecare atingere controlată a sârmei de baia metalică să se desprindă o singură picătură de material de adaos din sârma electrod. Rezultatul se poate numi „sudarea picătură cu picătură”.

Spre deosebire de cazul anterior referitor la sudarea oțelurilor galvanizate cu procedeul MIG-CMT sârma pentru sudare efectuează deplasare de înaintare și retragere față de piesa, cu frecvența ridicată. Aceasta face diferența de fond între procesul MIG-CMT de procedeul MIG/MAG convențional.

Transferul de metal se face aproape fără curent de sudare, în timp ce la procedeul convențional de sudare, cu arc scurt, transferul prin scurtcircuit se datorează unui curent mare de sudare.

Primele încercări experimentale utilizând procedeul MIG-CMT s-au realizat în variantă mecanizată la o viteză de îmbinare de 2m/min. Creșterea vitezei de îmbinare este posibilă datorită utilizării amestecului de gaz Ar+30%He+1%CO<sub>2</sub>. Prin stabilirea datelor de intrare corespunzătoare referitoare la materialul de bază: table cu grosimea de 1 mm, materialele de adaos: sârma CuSi3, gazul de protecție Ar+30%He+1%CO<sub>2</sub>, s-au obținut parametri optimi setați în tabelul 4.15.

Tabelul 4.15 Parametri la sudobrazarea MIG-CMT în variantă mecanizată

Is A	Vae m/min	Ua V	ds mm	Debit gaz l/min	Vs cm/min	Lcl mm
84	5,00	13,5	1	12	200	~15

#### 4.2.4.2 Sudobrazarea MIG-CMT în variantă manuală

Procedeul de sudobrazare MIG-CMT a oțelurilor galvanizate poate fi utilizat și în varianta manuală. În acest caz viteza de sudobrazare este limitată de operatorul sudor. Din această cauză gazul de protecție utilizat este argon 100%, iar curentul de sudare este mai mic chiar la îmbinarea unor table mai groase. Dacă în cazul îmbinării mecanizate curentul de sudobrazare este de aproximativ 80A la viteze de îmbinare de 2m/min, în cazul sudobrazării manuale curentul este de 60A la viteze de îmbinare limitate la 40-50 cm/min.

S-a ales materialul de bază cu grosimea de 1,5 mm, materialul de adaos sârma CuSi3, și gazul de protecție utilizat este argon 100%. Alegând ca date inițiale materialele probelor îmbinate selectați, parametrii de îmbinare sunt cei prezentați în tabelul 4.16. Pistoletul de sudare este înclinat la un unghi de 10-20°. La varianta de îmbinare prin tragerea arcului viteza de sudobrazare poate fi ușor mărită față de varianta prin împingerea arcului datorită pătrunderii mai mari. Prin aceasta stratul de zinc este mai puțin afectat de arcul electric.

Tabelul 4.16. Parametri la sudobrazarea MIG-CMT în variantă manuală

Proba	Is A	Vae m/min	Ua V	ds mm	Debit gaz l/min	Vs cm/min	Lcl [mm]
I1	63	3,9	8,5	1	12	40	~15
T2	60	3,9	8,5	1	12	45-50	~15
T3	50	3,4	8,4	1	12	45-50	~15

Proba 1 -împingere

Proba 2, 3- tragere

#### 4.2.5. Încercarea îmbinărilor realizate

Probele experimentale îmbinate prin procedeul cu aport termic scăzut MIG-CMT au fost supuse unor încercări specifice și complexe care să demonstreze calitatea îmbinărilor obținute, respectiv justificarea alegerii procedurii MIG-CMT la sudobrazarea tablelor galvanizate.

Încercările au constat atât în analiza macro și microstructurală a probelor precum și în încercări de tracțiune.

##### 4.2.5.1 Încercarea îmbinărilor realizate cu procedeul MIG-CMT în variantă mecanizată

a. *Analiza metalografică a îmbinărilor realizate cu procedeul MIG-CMT în variantă mecanizată*

Analiza metalografică constat în analiza macro și microscopică efectuată conform SR EN 1321:2000. În vederea examinării s-a efectuat atacul metalografic asupra probelor cu nital 10 pentru oțel, iar pentru îmbinarea cu clorură ferică, 1 parte  $\text{FeCl}_3$ , 8 părți  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

În figura 4.19 se prezintă aspectul macrostructural al probelor rupte în îmbinare. Și din analiza acestora se poate observa caracterul ruperii care este unul fragil. Aceasta deoarece este dificil de controlat difuzia stratului de zinc în îmbinare. Ca urmare a difuziei zincului se formează defecte de tipul porilor de zinc sau faze intermetalice între fier și zinc care sunt dure și fragile.



Fig. 4.19 Imagini macrostructurale ale suprafeței de rupere

Ulterior pe toate probele supuse încercării s-au efectuat examinări microstructurale la nivelul materialului de bază, precum și în materialul de bază cu ajutorul microscopului optic OLYMPUS CX41 la mărimi cuprinse între 100-500x.

La nivel microscopic în materialul de bază la nivelul zonei influențate termic se poate remarca faptul că îmbinarea nu are o influență semnificativă asupra materialului de bază în zona influențată termic. Aceasta deoarece prin sudobrazarea cu aport termic scăzut căldura introdusă în componente este scăzută ca urmare a vitezei mari de sudobrazare. Ca urmare în zona influențată termic se constată prezența unei regiuni caracterizată printr-o granulație fină, ce nu a suferit creșterea granulației datorită supraîncălzirii (figura 4.20).

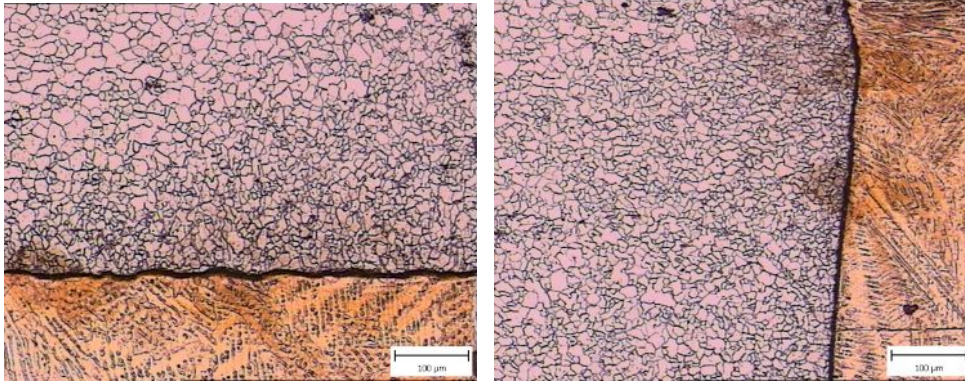


Fig. 4.20 Imagini microstructurale ale zonei influențate termic

Din analiza acestor examinări se poate observa în materialul depus cristalizarea dendritică a eutectoidului într-o matrice de soluție solidă  $\alpha$ . Aliajul de sudobrazare utilizat este  $\text{CuSi}_3$ , cu structură formată dintr-o soluție solidă  $\alpha$  de siliciu dizolvat în cupru, ce cristalizează în sistemul cubic cu fețe centrate, și un amestec mecanic eutectoid format din fazele  $\alpha$  și compusul intermetalic  $\text{Cu}_{33}\text{Si}_7$  (fig. 4.21).

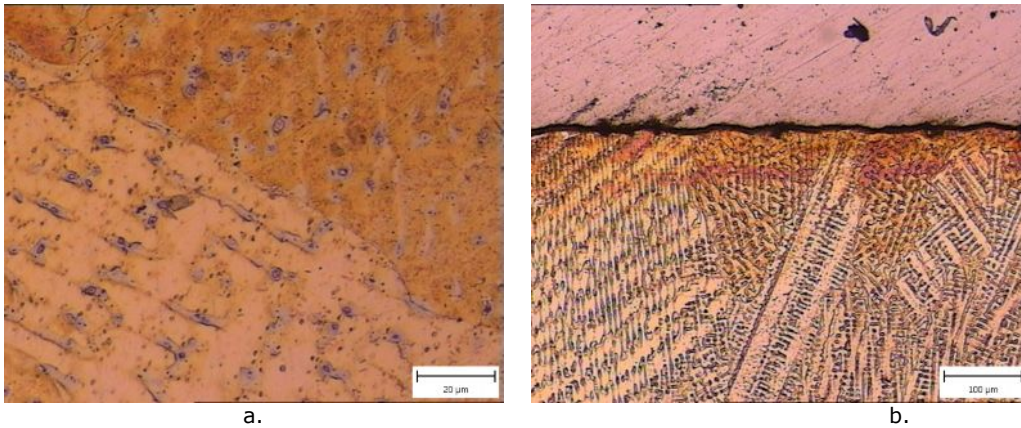


Fig.4.21. Imagini microstructurale ale îmbinării  
a. îmbinare, b. îmbinare-material de baza

De remarcat faptul că apare și o zonă de difuzie a cuprului în materialul de bază. Aceasta zona are o grosime de aproximativ  $8\mu\text{m}$  precum se poate observa în figura 4.22. Prezența acestei zone de difuzie în materialul de bază asigură o bună legătură între aliajul de brazare și metalul de bază, contribuind la mărirea rezistenței îmbinării brazate.

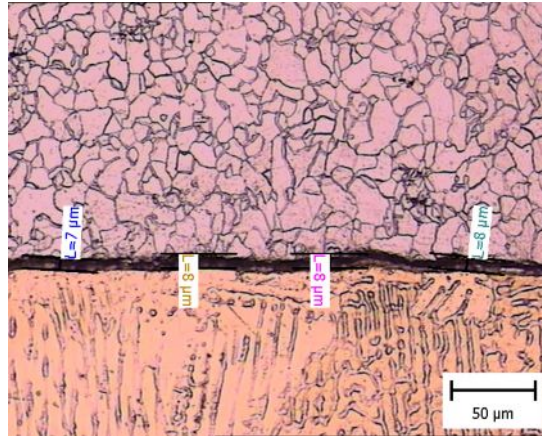


Fig. 4.22 Evidențiere zonă de difuziune a cuprului în materialul de bază

De asemenea datorita aportului termic scăzut indus de procedeul de îmbinare se poate observa ca stratul de zinc nu s-a deteriorat în zona adiacenta îmbinării, ceea ce denotă că protecția anticorozivă a tablelor zincate nu a fost afectată în timpul procesului de sudobrazare. Grosimea stratului de zinc a rămas practic aceeași, precum se poate observa din figura 4.23.

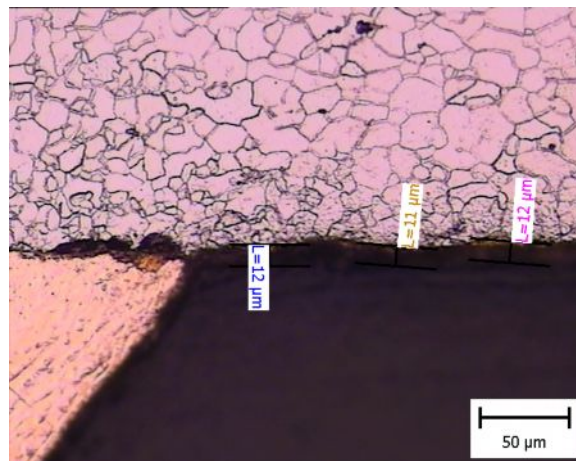


Fig. 4.23 Imagine microstructurală a zonei adiacente sudobrazării

*b. Încercarea la tracțiune*

Probele astfel îmbinate au fost supuse la încercări prin tracțiune, conform SR EN 895:1995. Încercarea s-a efectuat pe epruvetele de forma celor prezentate în figura 4.24.

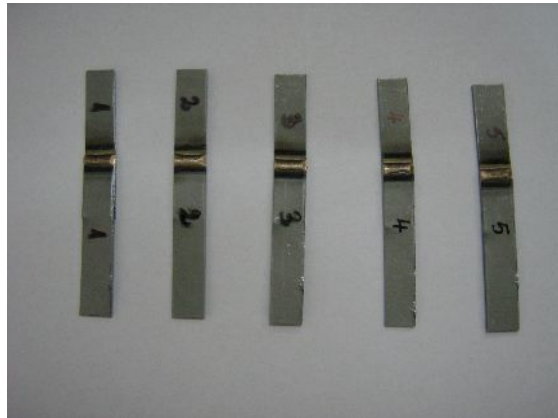


Fig. 4.24 Epruvetele încercate la tracțiune

Instalația de încercare la tracțiune existentă în dotarea catedrei SMS este prezentată în figura 4.25

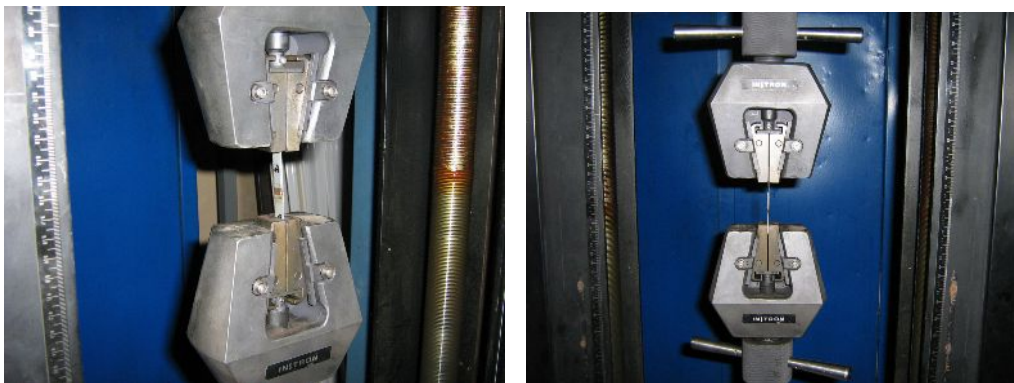


Fig. 4.25 Instalația de încercare la tracțiune

Modul în care decurge încercarea la tracțiune a îmbinărilor din table galvanizate este indicat în figura 4.26



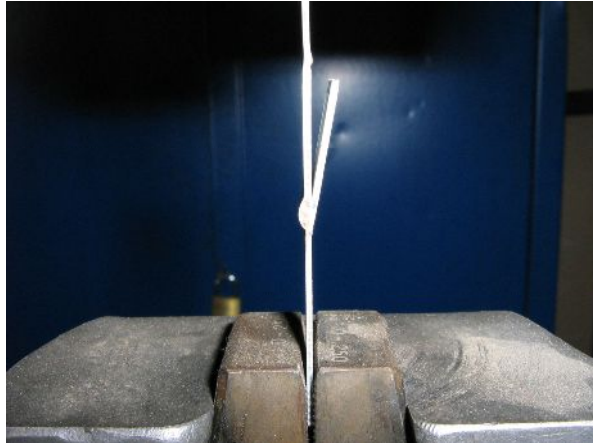


Fig.4.26 Încercarea la tracțiune

În urma încercării la tracțiune majoritatea probelor s-au rupt în materialul de bază ceea ce atestă utilizarea unor regimuri de sudare alese corespunzător. Două probe s-au rupt în îmbinare, fiind o rupere fragilă. Ruperea în îmbinare se datorează apariției unor faze intermetalice dure dintre fier și zinc. Rezultatele încercării sunt prezentate în tabelul 4.17, iar probele rupte sunt prezentate în figura 4.27.

Tabelul 4.17 Rezultatele încercării la tracțiune

Nr probă	Dimensiuni sudura		$F_{max}$	$F_{max,med}$	$R_m$	$R_{m,med}$	Obs.
	l mm	H mm	KN	KN	MPa	MPa	
1	15	2	3,1	3,4	103,33	113,33	Rupere în materialul de bază
2	15	2	3,7		123,33		Rupere în materialul de bază
3	15	2	3,7		123,33		Rupere în materialul de bază
4	15	2	3,5		116,66		Rupere în îmbinare
5	15	2	2,6		86,66		Rupere în îmbinare
6	15	2	3,6		120		Rupere în materialul de bază
7	15	2	3,6		120		Rupere în materialul de bază

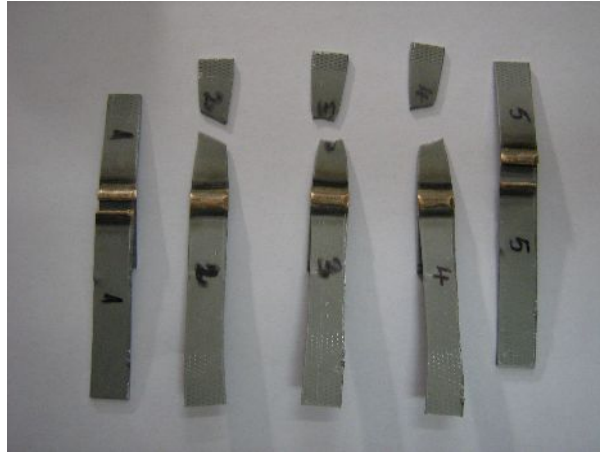


Fig. 4.27 Probele supuse la încercarea prin tracțiune

#### **4.2.5.2 Încercarea îmbinărilor realizate cu procedeul MIG-CMT în variantă manuală**

##### *a. Analiza metalografică a îmbinărilor realizate cu procedeul MIG-CMT în variantă manuală*

Similar cu analizele metalografice prezentate anterior s-au efectuat analize metalografice pe probele obținute la valori ale parametrilor de îmbinare prezentați în tabelul 4.16.

S-a utilizat același echipament de analiză, microscopul optic OLYMPUS CX41 la mărimi cuprinse între 50-500x. Pentru a putea evidenția aspectul îmbinării din cupru s-a efectuat un atac metalografic cu 1ml clorură ferică și 8 ml apă distilată la temperatura de 20°C timp de aproximativ 6 secunde.

În figurile 4.28, 4.29, 4.30 se prezintă aspectul zonei influențată termic pentru 3 probe îmbinate.

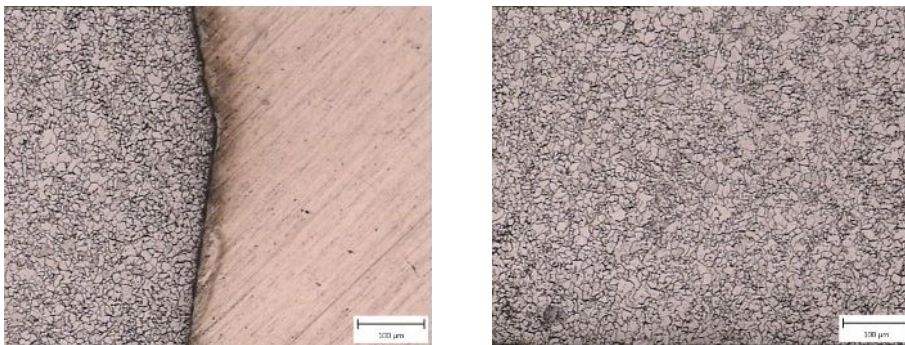


Fig. 4.28 Zona influențată termic la proba I1

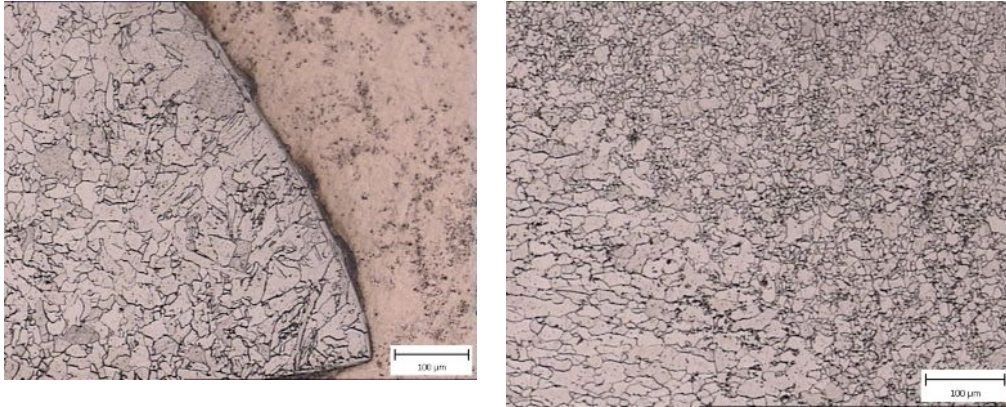


Fig. 4.29 Zona influențată termic la proba T2

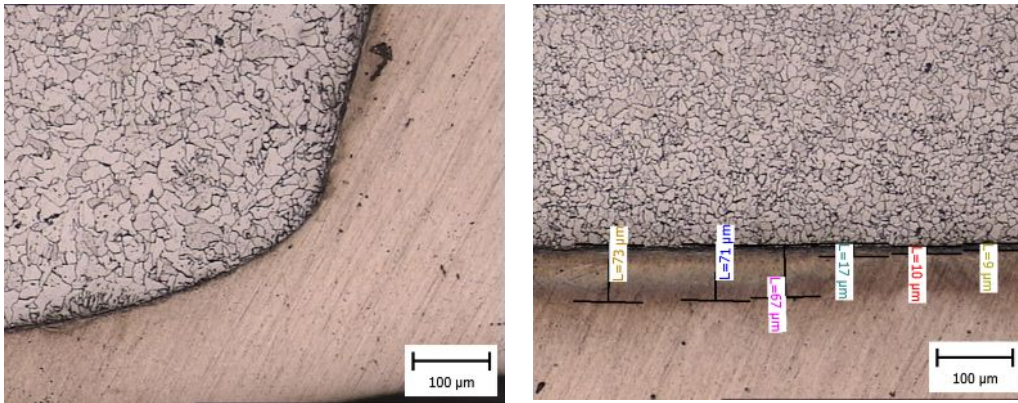


Fig. 4.30 Zona influențată termic la proba T3

Se observă că la proba I1, din figura 4.28 materialul de bază are o zonă influențată termic mai redusă fără creșterea granulației, în schimb la proba T2, din figura 4.29 granulația a crescut în zona de influență termică cu efecte negative asupra rezistenței mecanice a îmbinării. La proba T3 din figura 4.30 apare o zonă de difuziune în îmbinarea sudobrazată mult mai extinsă decât la sudobrazarea în variantă mecanizată.

În figurile 4.31, 4.32, 4.33 se observă aspectul îmbinării sudobrazate, precum și zona de difuziune a cuprului în materialul de bază.

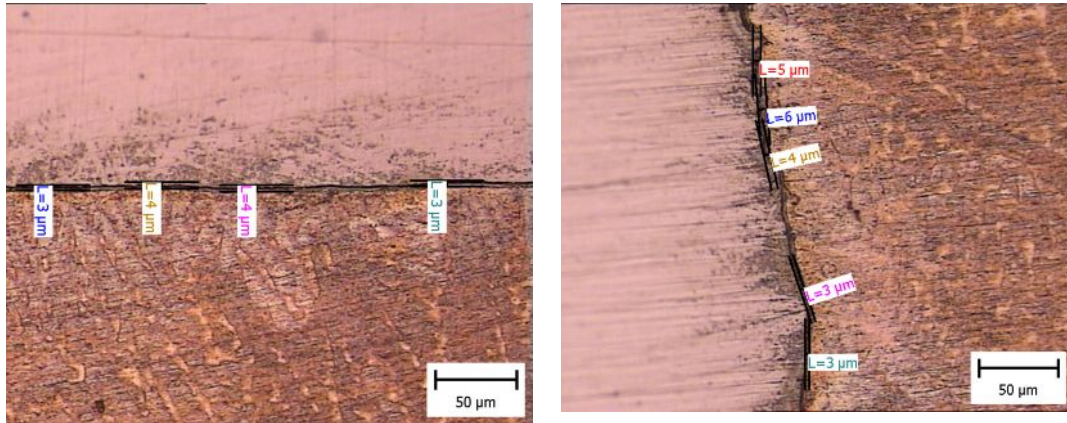


Fig. 4.31 Aspect îmbinare la proba I1

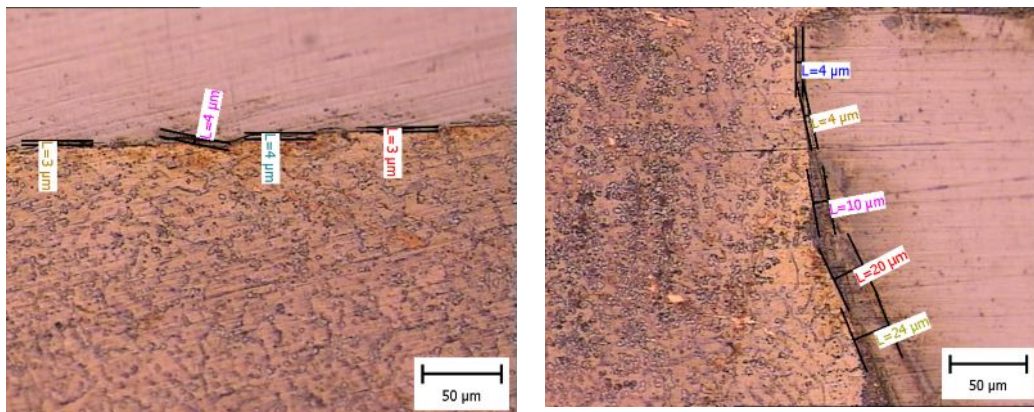


Fig. 4.32 Aspect îmbinare la proba T2

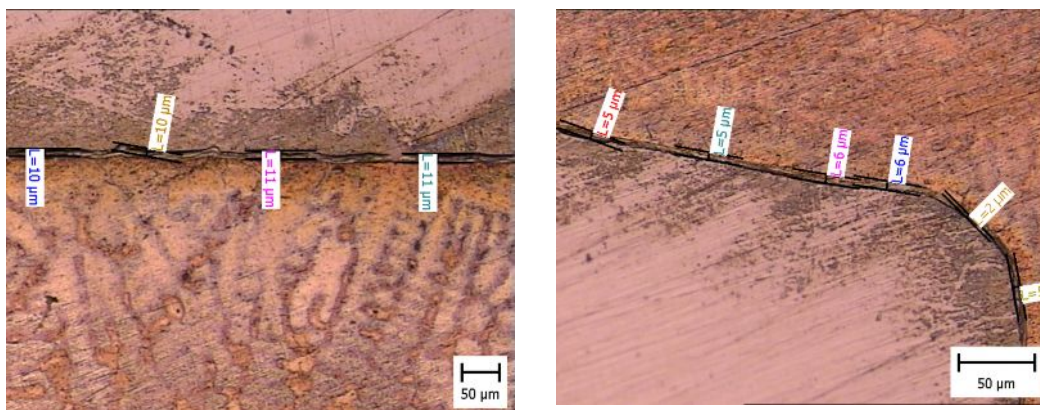


Fig. 4.33 Aspect îmbinare la proba T3

Atenție deosebită a fost acordată aspectului îmbinării sudate și a zonei de difuziune a cuprului în materialul de bază. Precum se observă din analizele metalografice zona de difuziune este mai extinsă pe table superioară a îmbinării la proba T2 din figura 4.32. La celelalte probe această zonă este mult mai îngustă fiind la valori de ordinul micronilor, ceea ce confirmă că parametri de îmbinare au fost aleși corespunzător.

*b. Încercarea la tracțiune a îmbinărilor realizate*

Pentru îmbinările realizate între oțel galvanizat - oțel galvanizat cu procedeul MIG-CMT în variantă manuală (probele I1, T2, T3) s-au efectuat încercări de tracțiune în urma cărora se pot trage următoarele concluzii:

- în cazul îmbinărilor realizate din oțel galvanizat-oțel galvanizat, pentru probele I1, T2, T3 s-au obținut caracteristicile mecanice comparabile cu cele corespunzătoare materialului de bază. Ruperea s-a produs în materialul de bază remarcându-se și o gătuire a probelor, alungirea medie fiind de cca. 37%.

În tabelul 4.18 se prezintă rezultatele încercării la tracțiune pentru cele 3 probe realizate prin sudobrazare cu aport termic scăzut în variantă manuală.

Tabelul 4.18 Încercarea mecanică la tracțiune la îmbinările oțel galvanizat – oțel galvanizat:

Nr probă	Nr încercare	Dimensiuni sudura		F <sub>max</sub> [KN]	F <sub>max,med</sub> [KN]	R <sub>m</sub> [Mpa]	R <sub>m,med</sub> [Mpa]	A [%]	A <sub>med</sub> [%]
		I [mm]	H [mm]						
Proba I1	1	20	2	4,8	5,54	120	135,86	-	29,7
	2	22	2	5,41		122,95		40,11	
	3	15	2	3,58		119,33		41,36	
	4	20	2	6,17		154,25		35,87	
	5	21	2	6,38		151,9		32,57	
	6	23	2	7		152,17		31,14	
	7	21	2	5,48		130,47		26,86	
Proba T2	1	21	3	7,5	5,94	119,04	135,4	52,6	44,35
	2	9	3	5,94		220		28,5	
	3	17	3	5,28		103,52		48,79	
	4	17	3	5,04		98		47,53	
Proba T3	1	17	3	5,41	5,54	106,07	99,23	39,88	37,29
	2	20	3	6,14		102,33		55,1	
	3	19	3	5,09		98,29		16,91	

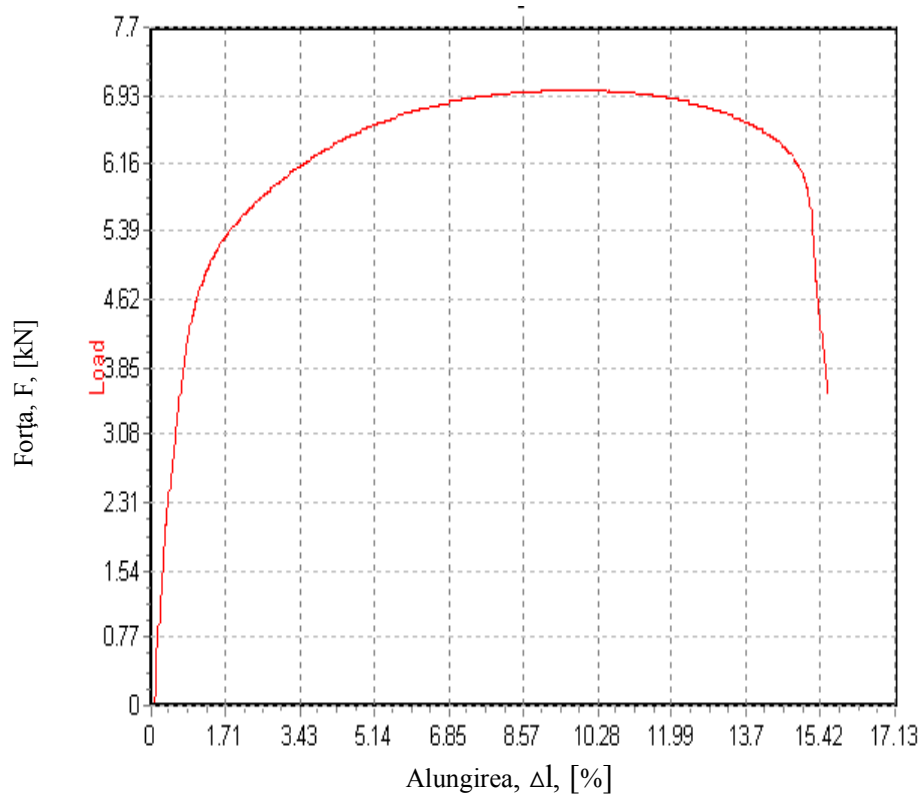


Fig. 4.34 Curba caracteristică pentru proba I1



Fig. 4.35: Proba I1

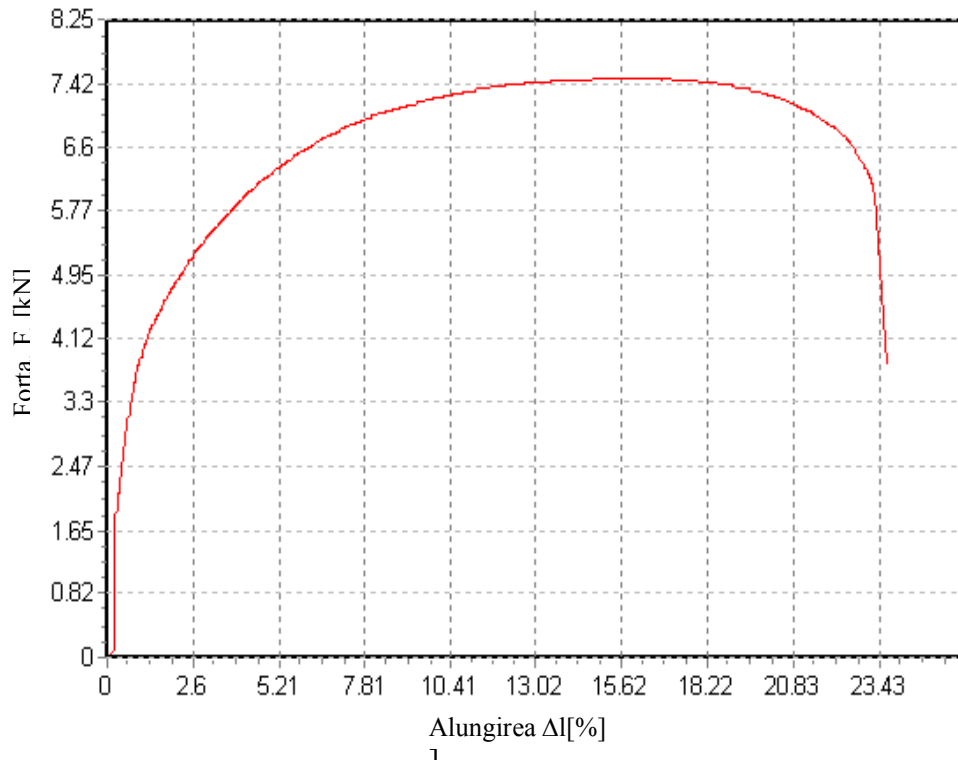


Fig. 4.36 Curba caracteristică pentru proba I2



Fig. 4.37 Proba I2

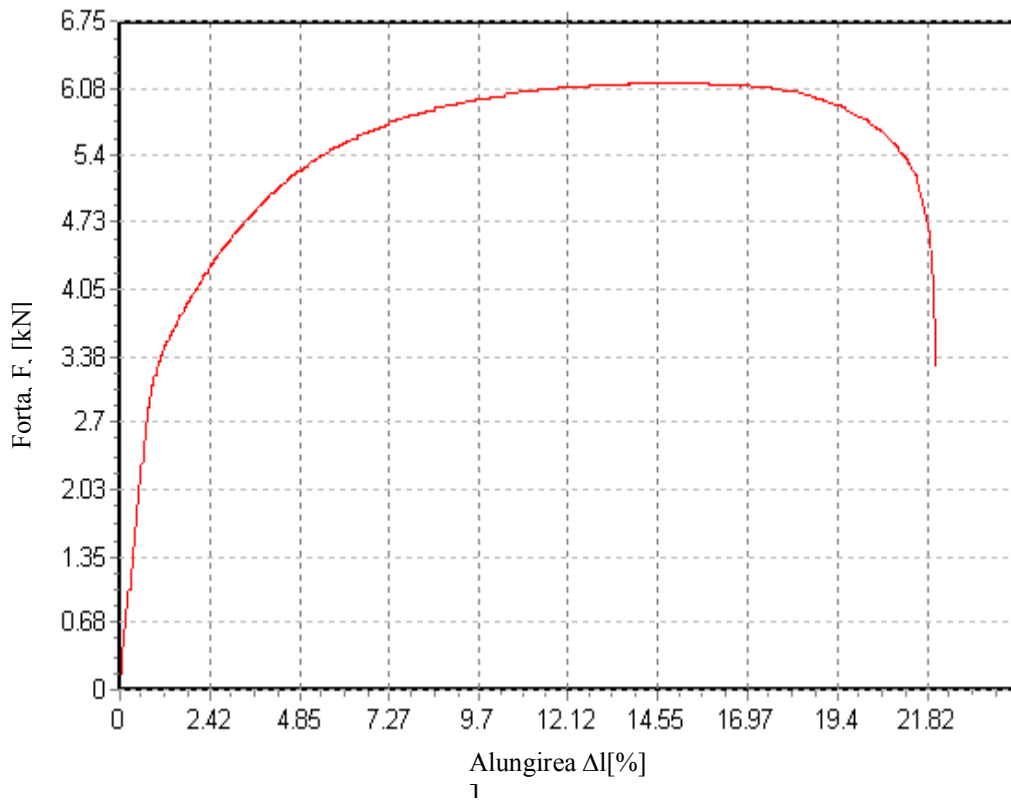


Fig. 4.38 Curba caracteristică pentru proba T3

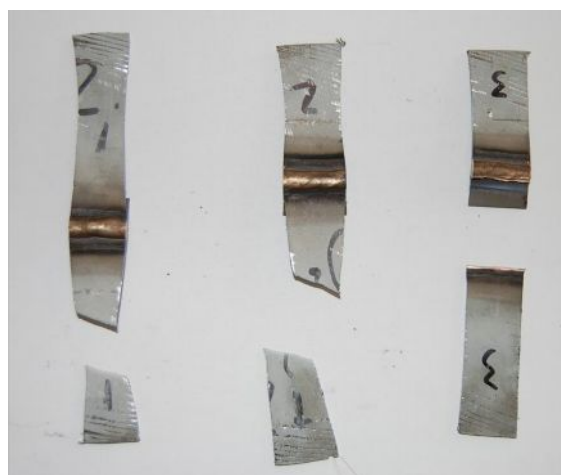


Fig. 4.39 Proba T3



Încercarea la tracțiune s-a efectuat conform SR EN 895: 1995. Pentru fiecare probă s-a înregistrat curba caracteristică (figurile 4.34, 4.36, 4.38). Se observă alungirea probelor și forța la care acestea s-au rupt. De remarcat faptul că ruperea are loc în materialul de bază pentru toate probele încercate (figurile 4.35, 4.37, 4.39). Ca urmare procedeul de sudobrazare cu aport termic scăzut MIG-CMT este indicat pentru realizarea îmbinării între oțeluri galvanizate, deoarece se pot obține îmbinări cu rezistență mecanică corespunzătoare în condițiile în care protecția anticorozivă a oțelurilor nu este afectată semnificativ.

#### 4.2.6 Încercări de rezistență la coroziune

##### 4.2.6.1 Analiza termogravimetrică a oțelurilor galvanizate

Termogravimetria, TG, se poate defini ca studiul schimbării masei materialelor în funcție de temperatură, de timp și într-o atmosferă dată. TG este o tehnică prin care se măsoară masa probei odată cu creșterea temperaturii. Metoda este utilă în determinarea purității probei precum și a concentrațiilor de apă, de carbonați sau de substanțe organice din materiale, dar în general pentru studierea oricărei reacții de descompunere termică.

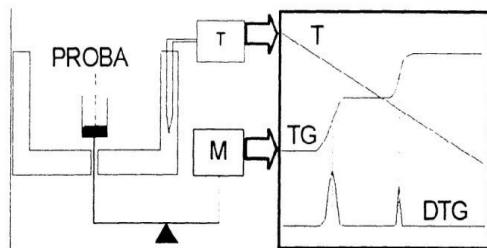


Fig. 4.40 Schema de principiu a înregistrării curbelor T și TG [100]

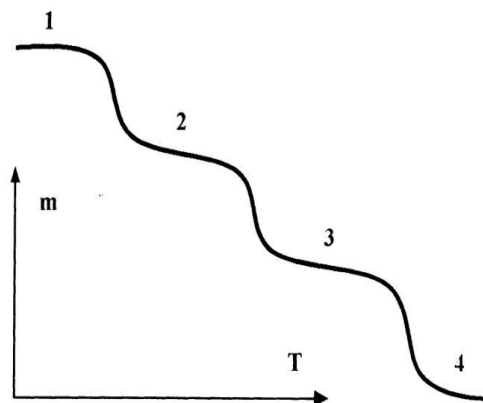


Fig. 4.41 Aspectul curbei termogravimetrice TG pentru oxalatul de calciu [100]

Astfel, prin încălzirea, sau răcirea cu viteză constantă a unei combinații sau a unui material, acesta poate suferi o serie de transformări atât fizice cât și chimice care pot fi puse în evidență prin măsurarea simultană a masei probei și a temperaturii acestuia. Modificările masice înregistrate duc la niște reprezentări grafice numite termograme sau curbe termogravimetrice TG precum și la diferențiale ale acestora DTG vizibile în fig. 4.40. Aparatura utilizată este descrisă principal în aceeași figură. Se observă că proba se încălzește într-un cuptor, a cărui temperatură se măsoară, viteza de încălzire fiind controlată în așa fel ca

temperatura să crească continuu și, pe cât posibil, liniar. Simultan proba se cântărește.

Termogramele, curbele TG, constituie adevărate amprente pentru probe formate din amestecuri complicate de substanțe, permițând chiar analize cantitative de minerale prin utilizarea metodei adaosului standard. Un exemplu de termogramă este prezentat în fig. 4.41. pentru oxalatul de calciu. Se poate observa câte un palier pentru fiecare compus care apare în urma transformării termice. Primul salt corespunde pierderii apei, al doilea transformării în carbonat iar al treilea descompunerii carbonatului în oxid de calciu și apă. Deci pe parcursul termogramei au loc reacțiile:



- *Analiza termodiferențială*

Analiza termodiferențială, DTA se bazează pe măsurarea diferenței de temperatură între probă și o substanță de referință, o dată cu încălzirea întregului sistem. Metoda este sensibilă la procese endo- și exotermice cum ar fi: tranziții de fază, deshidratări, descompuneri, reacții redox și reacții în fază solidă.

Curbele DTA, obținute în urma aplicării metodei, înregistrează diferența de temperatură,  $\Delta T$ , ce apare între probă și o substanță de referință, de regulă  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , aflate ambele în același cuptor într-un proces de încălzire. Este o tehnică veche, introdusă de W. C. Roberts-Austen încă din 1899. Se lucrează, de exemplu, cu un termocuplu diferențial prezentat în figura 4.42.

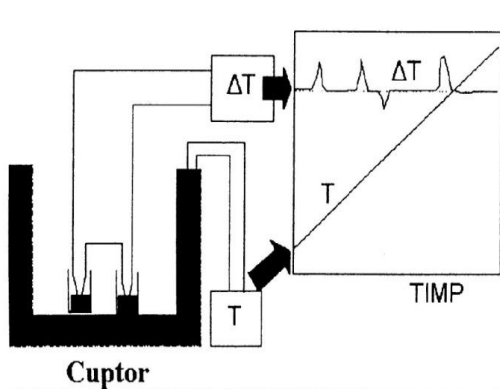


Fig. 4.42 Schema de principiu a obținerii curbelor DTA [100]

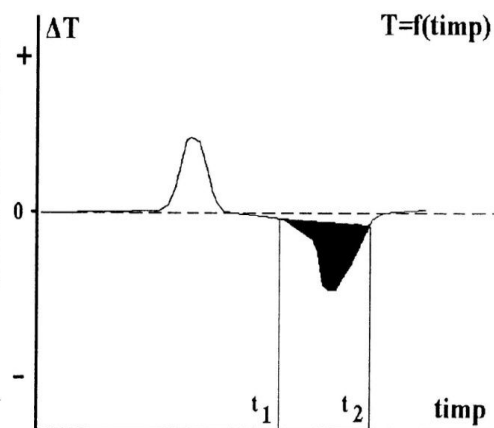


Fig. 4.43 Semnalul analitic în DTA [100]

Astfel, proba și materialul de referință se află ambele în aceleași condiții de temperatură  $T$ , fie în încălzire, fie în răcire sau păstrate la o valoare constantă a temperaturii în timp. La o anumită temperatură doar proba suferă o transformare - ce decurge, în funcție de natura acesteia, cu absorbție sau cedare de căldură. Curba  $\Delta T$  - funcție de  $T$  constituie curba termodiferențială sau DTA. Se pot pune în evidență fenomene exotermice,  $\Delta T < 0$ , sau endotermice, rezultând o curbă caracteristică pentru un anumit material, de ex. pământuri, minerale, metale.

Pentru cazul simplu când conductibilitatea termică a probei,  $k$ , coincide cu cea a probei etalon, inerte din punct de vedere al modificărilor de structură, sub acțiunea temperaturii, între masa probei  $m$  și  $\Delta T$  se poate scrie ecuația:

$$\Delta T = \frac{m}{k} \cdot \frac{dH}{dt} \quad (4.2)$$

unde  $dH/dt$  reprezintă cantitatea de căldură degajată, respectiv consumată de 1 mol substanță în unitatea de timp, la un moment dat,  $t$ . În intervalul de timp  $t_2 - t_1$ , cât durează transformarea endotermică, fig. 4.43, se poate scrie:

$$m \int \frac{dH}{dt} = k \int \Delta T dT \quad (4.3)$$

Pentru transformarea de mai sus, rezultatul primei integrale –  $\Delta H$  – fiind o constantă, iar numărul de moli  $N=m/M$ , ecuația se poate scrie:

$$N = \frac{k}{\Delta H} \int \Delta T dT \quad (4.4)$$

unde integrala reprezintă chiar aria de sub curbă. Deci, cunoscând efectul termic al reacției,  $\Delta H$  și determinând aria de sub curbă, se pot realiza cu această tehnică analize cantitative, evaluându-se numărul de moli  $n$  dintr-o substanță pe baza unei etalonări prealabile.

Aparatele ce înregistrează simultan curbele  $T$ ,  $TG$ ,  $DTG$  și  $ATD$  pe aceeași probă au primit denumirea de derivatografe.

- *Calorimetria diferențială*

Calorimetria diferențială este cunoscută sub prescurtarea DSC, de la differential scanning calorimetry, oferă aceleași informații dar prezintă câteva avantaje. Factorii cum ar fi granulația precum și pregătirea probei afectează mai puțin curbele, iar exactitatea și precizia sunt mult îmbunătățite. Metoda mai aduce în plus și calitatea de a se putea determina capacitățile calorice ale materialelor.

Calorimetria diferențială, DSC măsoară independent debitele de flux termic spre o probă și spre un etalon, care se află ambele la aceeași temperatură. Se determină apoi diferența dintre cele două fluxuri termice și se reprezintă grafic diferența dintre fluxurile termice, în funcție de temperatură.

Tehnica a fost introdusă în 1964 de Watson și O'Neill. Se utilizează două incinte calorimetrice, una conținând proba și alta, materialul de referință, separate una de alta, dar menținute de două dispozitive de încălzire separate, rezistențe de platină, la aceeași temperatură. Încălzirea, realizată electric, se înregistrează. În acest fel proba care absoarbe căldură va necesita o încălzire suplimentară pentru a se realiza temperatura dorită - cea fixată printr-un program de temperatură prevăzut dinainte. Finețea mai mare face posibile și alte aplicații ca:

- determinarea temperaturii de tranziție în polimeri,
- determinarea temperaturii de denaturare a proteinelor,
- identitatea a două materiale - cauciuc, sol, asfalt, ulei, vopsea.

Analiza termogravimetrică și termidiferențială a oțelurilor acoperite prin galvanizare a constatat în examinarea a două tipuri de materiale de bază:

- proba 1 a fost acoperită prin zincare galvanică

- proba 2 a fost pasivată după galvanizare cu  $\text{Cr}^{3+}$ .

Aceste experimentări s-au efectuat pentru a determina puritatea probei, precum și reacțiile de descompunere termică ce apar odată cu creșterea temperaturii. Pe de altă parte prin analiza termodiferențială se pot observa reacțiile în fază solidă dintre fier și zinc, precum și fenomenele exotermice sau endotermice.

În figurile 4.44 și 4.45 se prezintă rezultatele obținute în urma analizelor respective

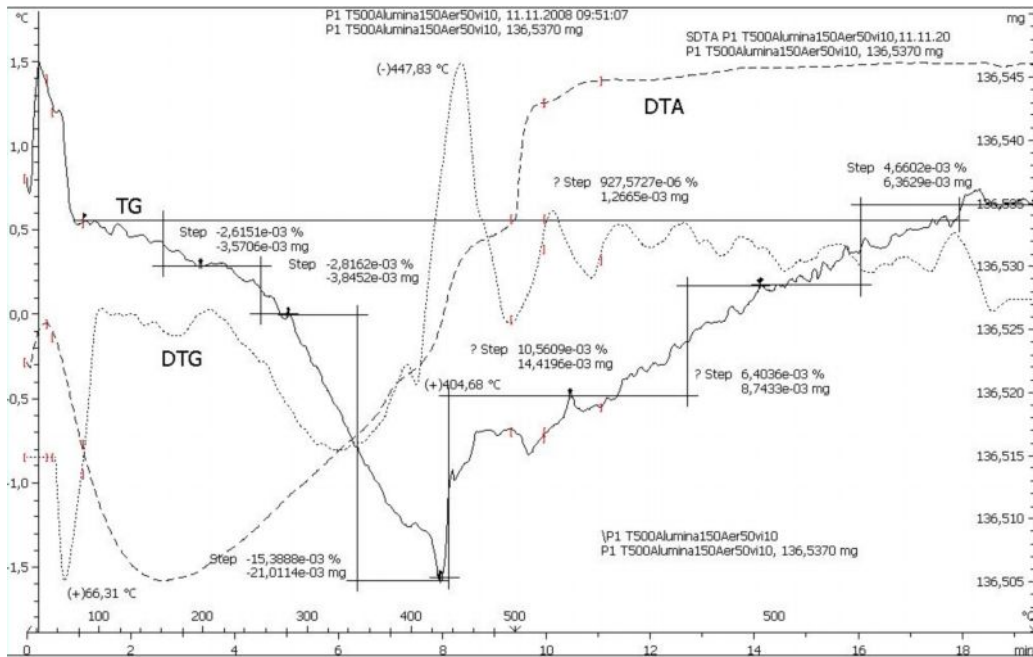


Fig. 4.44 Analiza termogravimetrică și termodiferențială a tablei galvanizate

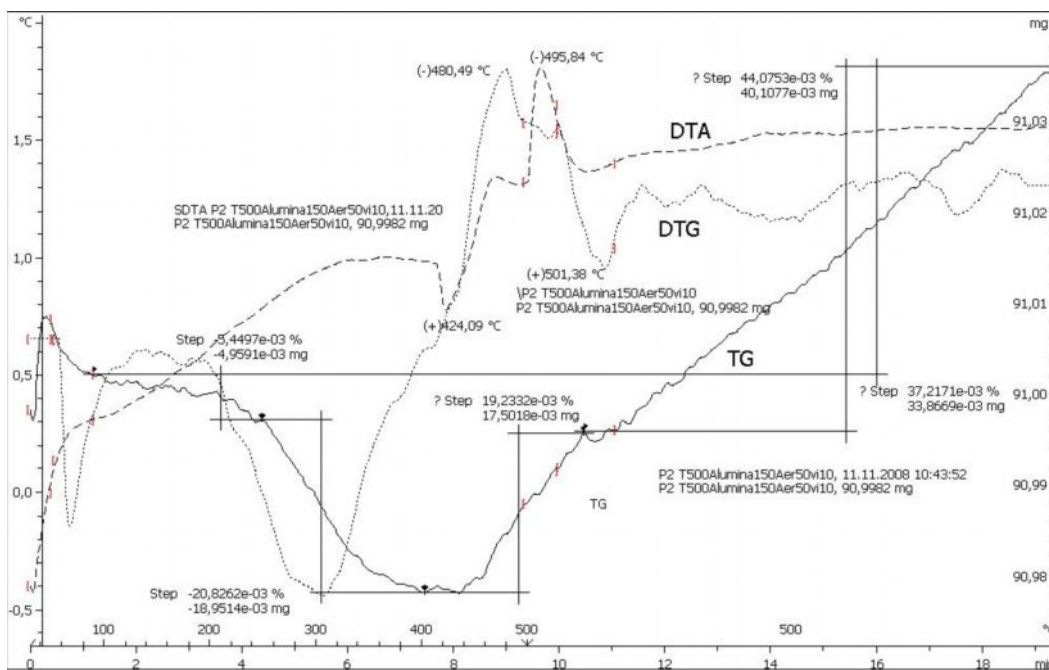


Fig. 4.45 Analiza termogravimetrică și termodiferențială a tablei galvanizate și pasivate cu  $Cr^{3+}$

Simbolizarile din figurile 3.6 și 3.7 sunt după cum urmează:

- TG, TGA-analiză termogravimetrică;
- DTG - derivata TG;
- DTA – analiză diferențială.

Determinările au fost făcute cu un aparat de analiză termică METTLER existentă la Institutul de Chimie al Academiei Române din Timișoara, iar procesul de scădere a greutății în funcție de temperatura este reprezentat cu ajutorul DTG. Încercarea pentru probele din oțel galvanizat s-a făcut timp de 20 de minute, la 500 grade Celsius, cu o viteză de 5 °C/min.

Se observă, funcție de temperatură, scăderea greutății. La cele două probe situația din punct de vedere al pierderii în greutate este aproximativ similară. Astfel stratul de zinc este deteriorat complet în jurul valorii de 420 °C, temperatura de topire a zincului. Scăderea în greutate este mai accentuată în cazul probei nepasivate. În cazul probei pasivate scăderea în greutate nu este semnificativă până la temperatura de 260 °C, iar în celălalt caz pierderea în greutate este semnificativă începând cu temperatura de 200 °C. În cazul probei 2 apare o reacție puternic exotermă la temperatura de 496 °C. De menționat de asemenea existența unor puncte de inflexiune: la proba 1 la temperaturile de 405 °C și la 448 °C, iar la proba 2 la temperaturile de 480 °C și la 501 °C. Prin această analiză se constată că degradarea stratului de zinc este mai redusă în cazul în care acesta este pasivat, având astfel o rezistență mai ridicată la prelucrare, la temperaturi ridicate în mediul ambiant. Se apreciază că la sudarea acestor oțeluri galvanizate, stratul de zinc este mai puțin deteriorat în cazul în care s-a efectuat și operația de pasivare cu  $Cr^{3+}$ .

#### **4.2.6.2. Încercarea de rezistență la coroziune în ceață salină a îmbinărilor sudobrazate din oțelurilor galvanizate**

Pentru a testa rezistența la coroziune atmosferică a metalelor acoperite și neacoperite ce urmează să fie utilizate în medii corosive proiectanții impun utilizarea testului de încercare în ceață salină.

Procedura de testare implică pulverizarea unei soluții sărate pe proba care urmează a fi supusă testării respective. Aceasta se face într-o încălțată cu temperatură controlată în condițiile în care soluția utilizată este NaCl. Proba supusă încercării este introdusă în incinta de testare și urmează a fi pulverizată pe suprafața de controlat, formându-se astfel în interiorul incintei o ceață salină cu o consistență foarte fină. De menționat că temperatura din interiorul camerei de testare trebuie menținută constantă. Procesul se desfășoară continuu, astfel proba este permanent umedă fiind supusă coroziunii permanent și constant.

Procedeele de încercare cuprind următoarele etape:

- incinta de testare este pregătită pentru încercare fiind prevăzută cu rafturi din lemn;
- se plasează probele în încălțată pe rafturile de lemn, la un unghi de declivitate mic;
- se pompează dintr-un rezervor apă ce conține o anumită concentrație NaCl printr-o duză de pulverizare;
- se face umidificarea incintei la o anumită presiune;
- se menține o temperatură constantă de lucru;

Testul poate fi oprit după un anumit număr de ore și anume: 2, 6, 24, 48, 96, 168, 240, 480, 720, 1000.

Camera de testare este rotită cu o anumită frecvență astfel încât toate probele încercate să fie expuse uniform testului

Pentru încercarea la coroziune a oțelurilor acoperite, rezistența acestora este analizată în funcție de următoarele aspecte:

- numărul de ore până când se evidențiază pe oțel urme de rugină;
- numărul de ore până când 5% din suprafața controlată este ruginită;
- numărul de ore până când 10% din suprafața controlată este ruginită etc.

Pentru oțelurile acoperite prin galvanizare cu zinc se apreciază că timpul aproximativ până când suprafața ruginită este de 5% trebuie să fie de minim 10 ore pe  $\mu\text{m}$  de zinc [14].

Încercarea la coroziune s-a efectuat conform standardului EN ISO 9227:2006 pe probe din oțel galvanizat îmbinate prin sudobrazare cu sârmă de CuSi3.

Instalația de testare utilizată (figura 4.46) a fost LIEBISCH SL-400 din cadrul departamentului Werkstoffkunde und Werkstoffpruefung de la Fachhochschule Gelsenkirchen din Germania.



Fig. 4.46 Camera de ceață salină LIEBISCH SL-400

Parametri utilizați la testare sunt prezentați în tabelul 4.19.

Tabelul 4.19 Parametrii regimului de încercare la coroziune în ceață salină

Concentrația de sare g/l	Debit NaCl l/h	Presiunea de încercare bar	Presiunea sistemului de umidificare bar	Temperatura camerei de testare °C	Temperatura sistemului de umidificare °C
50	0,8	1,4	2,4	35	50

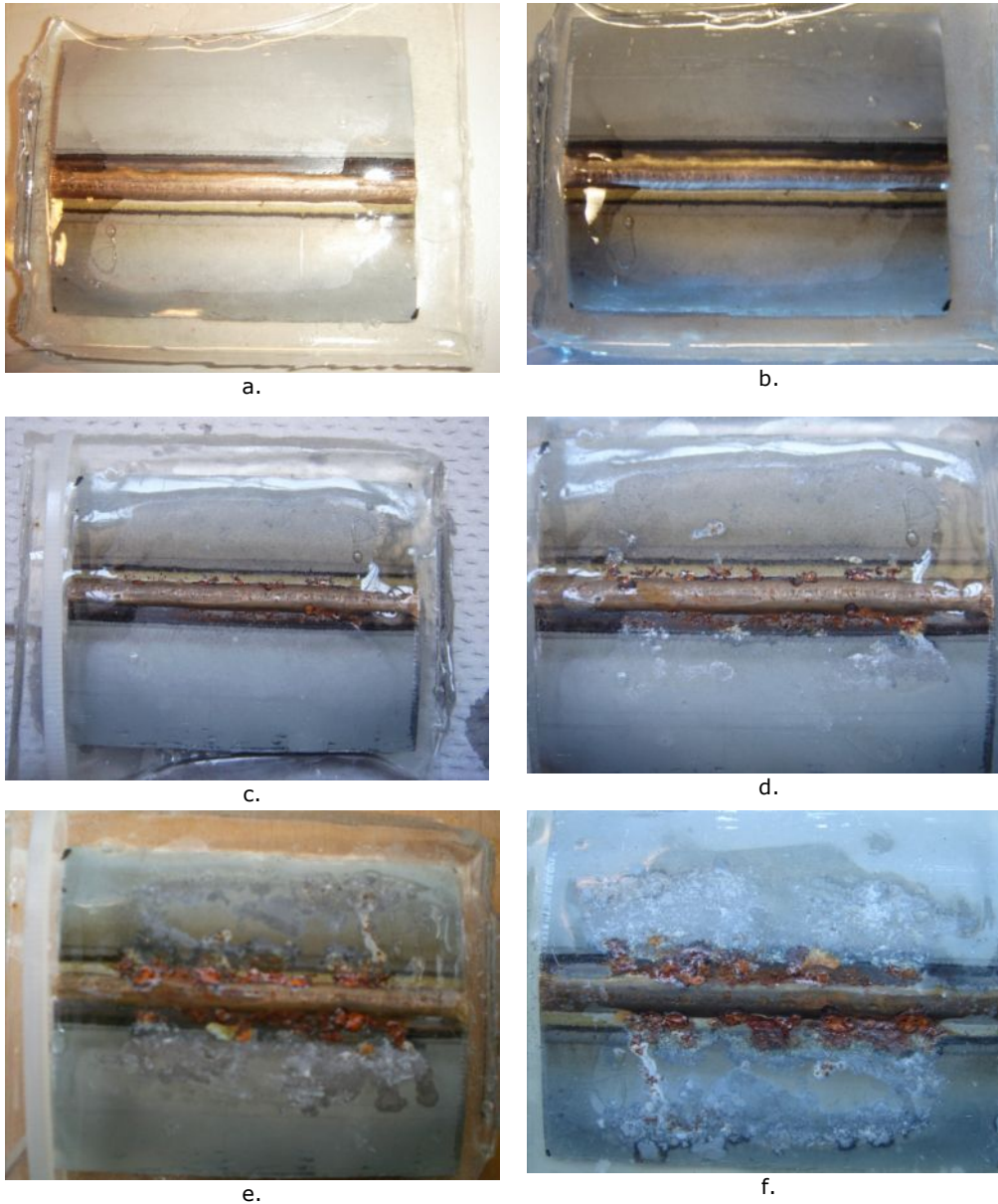


Fig. 4.47 Îmbinare prin sudobrazare a oțelurilor galvanizate supusă la testului de coroziune în ceață salină

- a. înainte de începerea testului; b. după 24 ore de la începerea testului; c. după 48 ore de la începerea testului; d. după 72 ore de la începerea testului; e. după 144 ore de la începerea testului; f. după 168 ore de la începerea testului.

Proba supusă încercării la coroziune în ceață salină a fost analizată la anumite intervale orare. În figura 4.47 se prezintă proba după încercarea la 24, 48, 72, 144 și 168 ore. Încercarea a fost oprită după 168 ore deoarece proba s-a corodat în mare măsură în zona îmbinării.



În urma analizei probei supuse încercării de coroziune s-au putut observa:

- primele urme de coroziune apar după 48 de ore de la începerea operației de testare;
- după 72 ore se apreciază că rugina acoperă 5% din suprafața supusă încercării;
- urmele de rugină se regăsesc în zona îmbinării;
- în urma operației de sudobrazare stratul de zinc s-a redus prin arderea acestuia;
- stratul de zinc inițial a fost de circa 8-10μm ceea ce ar însemna o suprafață ruginită de 5% după aproximativ 80-100 ore de la începerea încercării;
- se poate aprecia că datorită procedului de îmbinare, precum și a utilizării materialului de adaos pe bază de cupru rezistența la coroziune a tablelor zincate în urma îmbinării s-a redus nesemnificativ;
- după 168 de ore testul poate fi oprit conform EN ISO 9227: 2006 utilizate la încercare;
- pentru a obține o comportare mai bună la coroziune a tablelor galvanizate, acestea ar trebui îmbinate prin procedeul laser-MIG;

Se poate aprecia că la îmbinarea oțelurilor galvanizate stratul de zinc se deteriorează foarte puțin și protecția anticorozivă nu este afectată dacă se respectă condițiile:

- procedeul de îmbinare trebuie să fie cel de sudobrazare cu aport termic scăzut MIG-CMT;
- alegerea corespunzătoare a parametrilor de îmbinare prin sudobrazare;
- folosirea unui material de adaos adecvat în special sârma CuSi3 care să ofere protecție anticorozivă îmbinării.

### **4.3 Îmbinarea disimilară oțel galvanizat - aluminiu**

O etapă a programului de cercetări experimentale s-a referit la îmbinarea disimilară oțel galvanizat – aluminiu realizată utilizând procedeul MIG cu aport termic scăzut, varianta CMT.

#### **4.3.1 Materiale utilizate**

Materialele de bază utilizate în experimentări au fost: oțel acoperit prin galvanizare cu zinc și tablă din aliaj de aluminiu, AlMg3. Grosime tablelor din aliaj de aluminiu este de 1,25 mm, iar grosimea tablei din oțel galvanizat este de 1,5 mm.

Stabilirii parametrilor optimi de sudare a impus cunoașterea exactă a compoziției chimice a materialelor de baza. Aceasta a fost determinată cu ajutorul metodei spectrometriei optice (anexa 2). Prin această analiză s-au observat mici diferențe de compoziție chimică a aliajului AlMg3, precum și a oțelului acoperit prin galvanizare care nu afectează semnificativ îmbinarea celor două materiale.

#### **4.3.2 Materiale de adaos utilizate**

Materialul de adaos utilizat a fost sârma AlMg. Sârma are un conținut de până la 5% Mg și este caracterizată prin proprietăți mecanice bune și rezistență înaltă la coroziune și coroziune marină. Gazul de protecție utilizat este argon 100%.

### 4.3.3 Echipamentul utilizat

Echipamentul de sudare utilizat este Trans Puls Synergic 2700 CMT produs de firma Fronius. Materialul de adaos sub formă de sârmă este antrenat printr-un sistem de role, DAS și introdus în arzător prin intermediul pachetului de furtunuri. Deoarece materialul de adaos este mai moale decât sârma de oțel se impune să se utilizeze un dispozitiv de avans sârmă format din patru role. De menționat că în acest caz canalul rolor trebuie adaptat la diametrul materialului de adaos, acestea având o formă semicirculară. Furtunurile de alimentare trebuie să fie din teflon pentru a asigura o rezistență minimă la alunecare. De asemenea pachetul de furtunuri nu trebuie să fie mai lung de 3m. Alimentarea se face în condiții excelente la sistemul de alimentare „push-pull”. Pentru o funcționare îndelungată se recomandă folosirea unui pistol răcit cu apă.

### 4.3.4 Probe experimentale

Îmbinarea prin sudare a aluminiului cu oțelul creează multe probleme. Diferențele mari ale proprietăților chimice și fizice dintre cele două materiale, precum și insolubilitatea aluminiului în oțel conduce la formarea unor faze intermetalice foarte dure și fragile, grosimea acestora depinzând de căldura introdusă la sudare. Aceste faze intermetalice de tipul  $Fe_2Al_5$  și  $FeAl_3$  scad rezistența îmbinării datorită durtății mari, cu valori de 1100 HV.

Pentru a realiza o îmbinare corespunzătoare între aluminiu și oțel trebuie ca faza intermetalică formată să aibă o grosime mai mică de 10  $\mu m$ . Alegerea procedurii de îmbinare cu aport termic scăzut MIG-CMT permite îmbinarea oțelului cu aluminiu la valori mici ale energiei liniare introduse fapt ce conduce la o încălzire redusă a componentelor și prin urmare faza intermetalică poate fi diminuată, ajungând la grosimi foarte mici. Se precizează că datorită temperaturii mai reduse și utilizarea unui material de adaos din aliaj de aluminiu, oțelul nu ajunge la temperatura de topire. Așadar în acest caz rezultă două tipuri de îmbinare, aluminiu se sudează, iar oțelul se sudobrazază, fiind vorba de fapt de o îmbinare hibridă.

Experimentările au constat în realizarea de îmbinări disimilare dintre table galvanizate și aliaj de Al-Mg. Probele Al1-Al5 au fost realizate folosind varianta manuală de îmbinare, iar în cazul probei Al6 s-a folosit varianta de sudobrazare mecanizată. Viteza de sudobrazare în cazul variantei manuale a fost normală unui proces manual, 35 - 40 cm/min, iar în cazul variantei mecanizate viteza a fost mare. Parametrii de îmbinare sunt indicați în tabelul 4.20.

Tabelul 4.20 Parametrii de îmbinare oțel galvanizat-aliaj aluminiu prin procedeul MIG-CMT

Proba	Tip sârmă	ds mm	Is A	v <sub>ae</sub> m/min	Ua V	V <sub>s</sub> cm/min	Gaz protecție	Debit gaz l/min
Al1	AlMg	1.2	40	3,0	10.7	35-40	Ar 100%	10
Al2		1.2	56	3,6	11.5	35-40		11
Al3		1.2	50	3,4	11.4	35-40		10
Al4		1.2	51	3,4	11.4	35-40		10
Al5		1.2	62	4,0	11,8	35-40		12
Al6		1,2	73	4,9	14,8	100		12

Probele Al1-Al5 – sunt realizate manual, iar proba Al6 mecanizat

În timpul execuției probelor s-a observat un bun transfer al materialului de adaos spre baia metalică, fără stropiri. Modul operator a fost prin împingere cu înclinația pistolului la 10-20° față de poziția verticală.

#### 4.3.5 Încercarea îmbinărilor realizate

##### 4.3.5.1 Analiza metalografică a probelor realizate

Programul de încercări pentru testarea calității îmbinărilor realizate a constat în analiza metalografică a probelor, conform SR EN 1321: 2000 și în încercări mecanice de tracțiune conform SR EN 896: 1995.

###### a. Analiza metalografică a probelor Al1-Al5 realizate în variantă manuală

Îmbinările disimilare obținute prin procedeul CMT, au fost supuse analizei macro și microscopice în vederea caracterizării lor.

În vederea unei examinări microscopice corespunzătoare se pregătește proba prin înglobarea în duracryl pentru a fi prelucrată metalografic. Șlefuirea se face cu hârtie abrazivă cu o granulație începând de la P=120,400, 800 până la P=1200.

Șlefuirea cu hârtie abrazivă se face în prezența unui jet de apă pentru a se îndepărta particulele rezultate în urma șlefuirii.

Urmează apoi etapa în care se șlefuieste pe pâslă, cu o emulsie de pastă diamantată de la 9μm, 6μm, 3μm, 2μm, 1μm, 0,25μm, după care proba se spală cu alcool etilic.

După prelucrare mecanică proba se atacă astfel: pentru aliajul din aluminiu se face un atac de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> și HF, pentru oțel se face atacul cu alcool etilic/etanol 98% și HNO<sub>3</sub>, au denumirea de soluție nital 2%.

Imaginea macroscopică a acestor îmbinări relevă apariția unei zone influențate termic, în materialul de bază (figura 4.48). Zona influențată termic mai extinsă în cazul îmbinărilor probelor Al1 și Al4 comparativ cu celelalte probe.

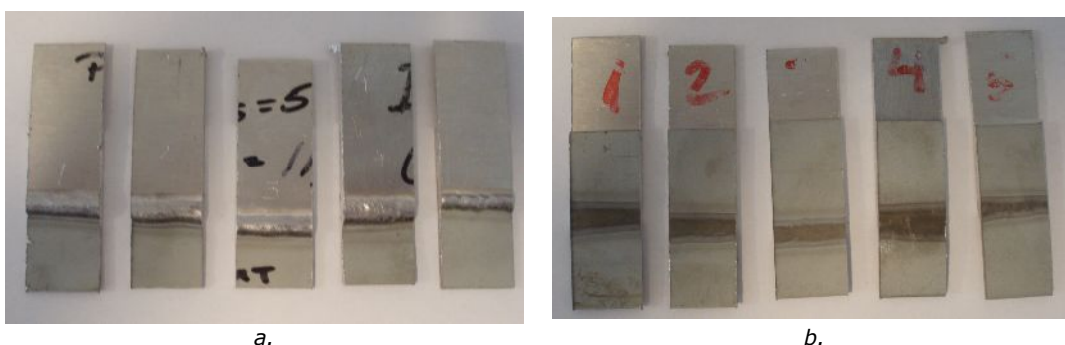


Fig. 4.48 Imaginea macroscopică a îmbinărilor disimilare oțel galvanizat-aluminiu a-față, b-verso

La nivel macroscopic se constată însă că în zona influențată termic se degradează stratul de zinc de la suprafața oțelului galvanizat, fără a se sesiza o modificare evidentă a structurii.

În aprecierea microstructurii probelor s-a pornit de la diagrama de echilibru fazic Al-Mg.

Ca material de adaos s-a folosit sârma de Al-Mg, în condițiile în care una dintre componentele îmbinării disimilare este un aliaj AlMg3. Aliajele Al-Mg care conțin între 3 și 6 % Mg prezintă o bună rezistență la coroziune și proprietăți mecanice ridicate [90]. Pentru analiza structurală a îmbinării astfel obținute se apelează la diagrama de echilibru Al-Mg (figura 4.49).

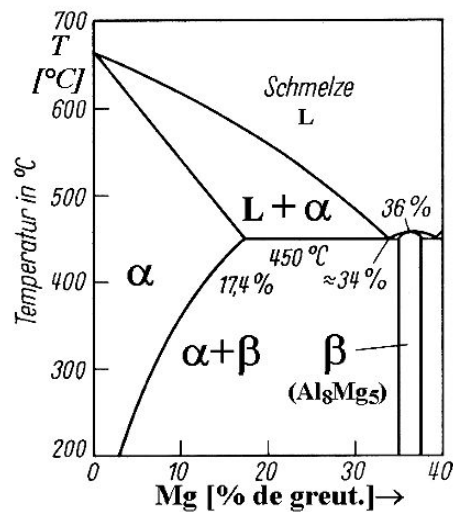


Fig. 4.49 Diagrama de echilibru fazic Al-Mg [90]

Se constată că sistemul Al-Mg prezintă o reacție eutectică la 35 % Mg și 450 °C, ce conduce la formarea unui amestec mecanic eutectic alcătuit dintr-o soluție solidă α de magneziu dizolvat în aluminiu și compusul intermetalic Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>. De asemenea se remarcă o solubilitate ridicată a magneziului în aluminiu la temperatura transformării eutectice (17,4%), care însă scade semnificativ o dată cu scăderea temperaturii, ajungând până la aproximativ 1,4% la temperatura ambiantă. În consecință, la temperatura ambiantă, la aliajele care au până la 17,4% Mg va precipita Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> ca fază intermetalică și fază secundară la limita grăunților de fază α.

Structura materialului de bază este formată din grăunți poliedrici de ferită, la limita cărora apar și precipitări de cementită terțiară, evidențiată prin dedublarea unor limite de grăunți. (figura 4.50).

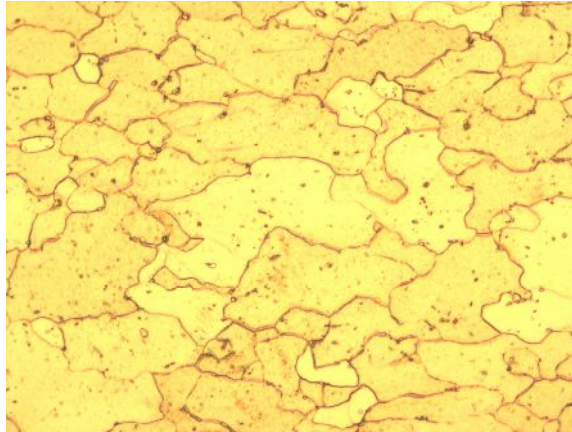


Fig. 4.50 Microstructura materialului de bază, MO 500x

Nu se remarcă la niciuna din probele examinate modificarea structurii datorată încălzirii în timpul procesului de îmbinare MIG-CMT (figura 4.51).

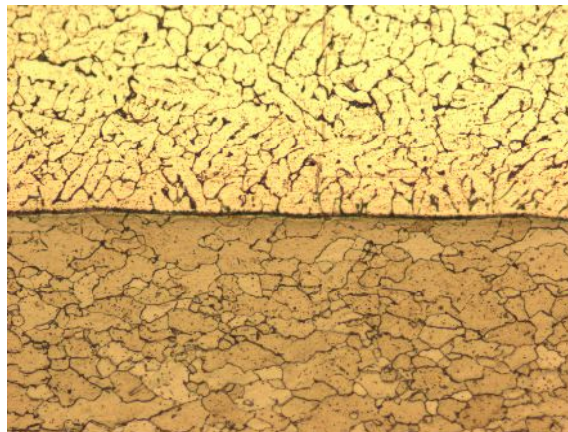


Fig. 4.51 Microstructura îmbinare oțel-material depus, MO 200x

Analiza microscopică a îmbinării evidențiază o structură alcătuită din soluția solidă  $\alpha$ , ce devine cu aspect dendritic și particule grosiere de  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  ce sunt dispuse la limita de grăunți (figura 4.52). De menționat că precipitarea fazei  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  la limita de grăunți mărește fragilitatea aliajului Al-Mg.

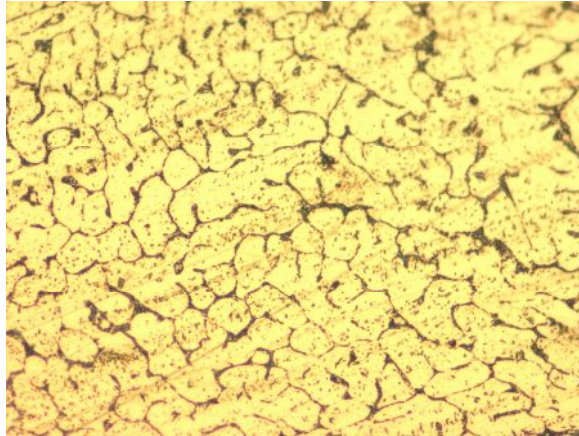


Fig.4.52 Microstructura subzonă de îmbinare, MO 500x

La toate probele se remarcă în imbinarea obținută prin procedeul MIG-CMT prezența porilor, cu o pondere mai mare ca dimensiuni și dispunere în cazul probelor 1-4 și în mai mică măsură în cazul probei 5 (figura 4.53). De asemenea se constată și nepătrunderea materialului de adaos în rostul rezultat prin suprapunerea tablelor de îmbinat (figura 4.54 e).

Aceste fenomene se datorează unei fluidități reduse a materialului de adaos ca urmare a lipsei eutecticului din structura acestuia, ceea ce conduce la o mai mică întindere și umectare (figura 4.53).

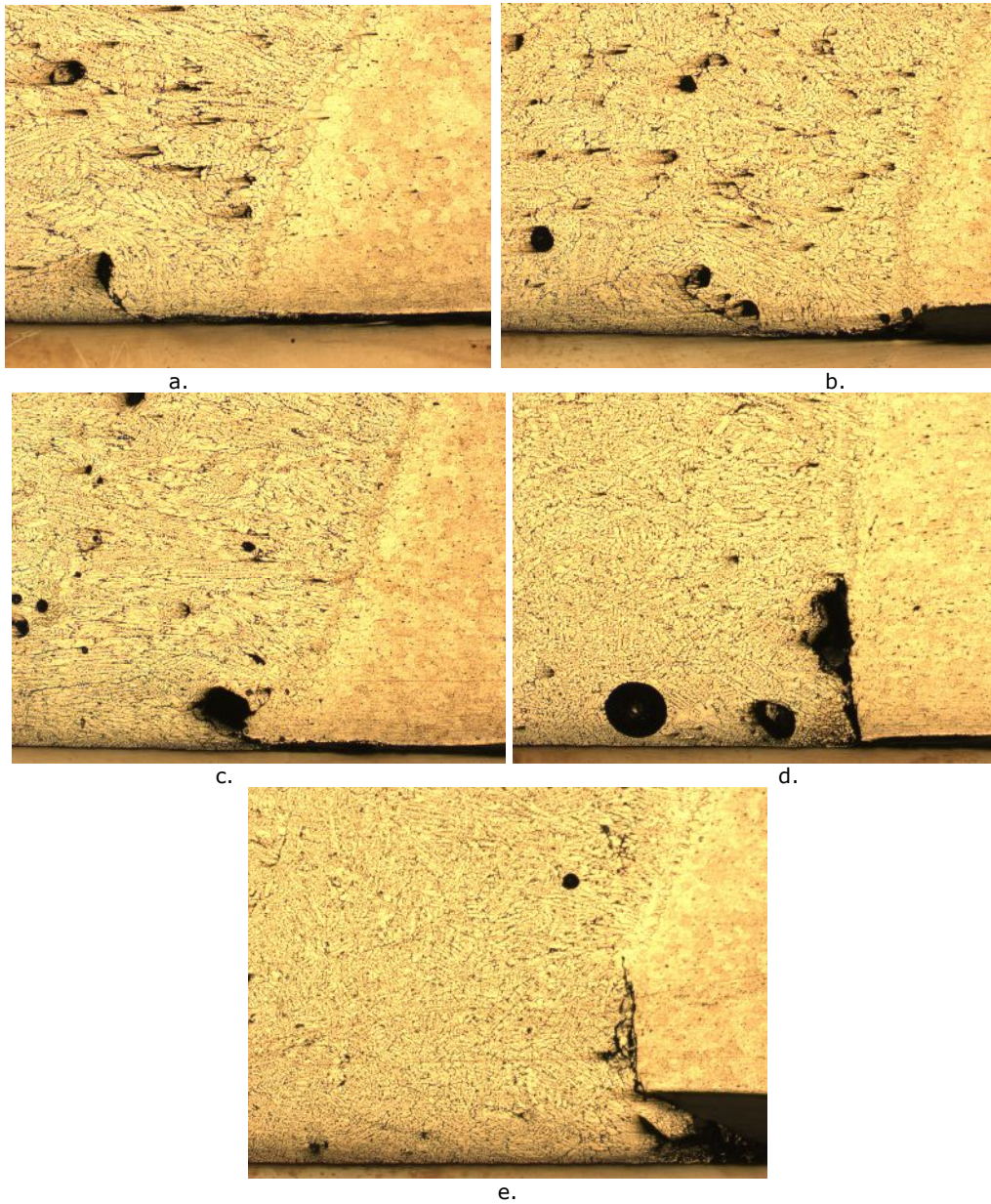


Fig. 4.53 Microstructura subzona îmbinare aluminiu-material depus, MO 100x  
a. proba AI1, b. proba AI2, c. proba AI3, d. proba AI4, e. proba AI5

De remarcat faptul că apare și o zonă de difuzie a aluminiului în materialul de bază, a cărei prezență asigură o bună legătură între materialul de adaos și materialul de bază, contribuind la mărirea rezistenței îmbinării.

b. *Analiza metalografică a probei Al6 realizată în variantă mecanizată*

Proba Al6 a fost realizată prin același procedeu de îmbinare, dar a fost aleasă viteza de îmbinare mecanizată. Prin aceasta s-a urmărit reducerea încălzirii pieselor și prin aceasta diminuarea zonei de difuzie dintre aluminiu și oțel. Precum s-a arătat în capitolul 3 această zonă de difuzie trebuie să aibă valori sub  $10\ \mu\text{m}$  pentru a putea avea o îmbinare corespunzătoare din punct de vedere a rezistenței mecanice. Parametrii de sudare sunt aproape similari cu variantele manuale, în schimb s-a mărit viteza de îmbinare la varinata mecanizată și prin aceasta s-a dimiuit energia liniară introdusă în componente.

În figura 4.54 se prezintă microstructura acestei probe în care s-au făcut măsurători ale stratului de difuzie dintre Al și oțel. Această zonă este în jur de  $10\ \mu\text{m}$  ceea ce poate conduce la concluzia că proba astfel îmbinată corespunde din punct de vedere al rezistenței mecanice.

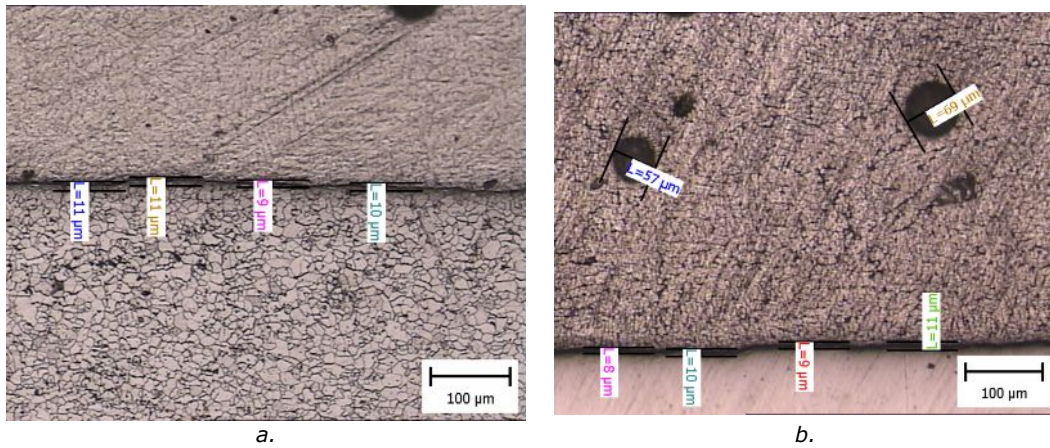


Fig. 4.54 Microstructură îmbinare proba Al6  
a-în oțel, b-în îmbinare

După cum se observă în figura 4.54 structura materialului de bază, oțel galvanizat nu a fost afectată semnificativ de procesul de îmbinare, datorită energiei liniare reduse. În schimb datorită vitezei mari de sudare în îmbinarea din aluminiu au rămas pori de dimensiune relativ mare ceea ce conduc la slăbirea rezistenței mecanice a îmbinării. Acest defect fiind cel care a cauzat ruperea probei în îmbinare precum se observă în figura 4.55.



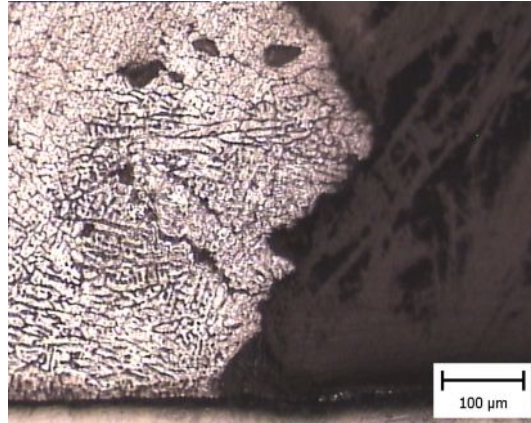


Fig. 4.55 Microstructură proba Al6 în zona ruperii

#### **4.3.5.2 Încercări mecanice pe probele îmbinate**

În vederea verificării tehnologiei de îmbinare a oțelului galvanizat cu aluminiu, prin procedeul CMT s-au efectuat încercări mecanice ale acestor îmbinări. Epruvetele au fost extrase din probele Al1-Al3 realizate în varianta manuală, respectiv din proba Al6 realizată mecanizat.

Încercările mecanice au fost încercări de tracțiune efectuate conform SR EN 895:1995 pe epruvete plate cu dimensiunile înscrise în tabelul 4.21.

Pentru îmbinările realizate din aluminiu-oțel galvanizat (probele Al1, Al2, Al3 și Al6) se pot trage următoarele concluzii:

- pentru probele Al1, Al2, Al6 caracteristicile mecanice de rezistență,  $F_{max}$  și  $R_m$ , forța maximă și rezistența la rupere au valori mari  $F_{max}=3,26KN$  respectiv  $R_{m,med}=82,24Mpa$ . Aceasta denotă o realizare corespunzătoare a îmbinării în timp ce pentru epruvetele din proba Al3 la care îmbinarea a fost realizată necorespunzător aceleași caracteristici mecanice de rezistență au fost de  $F_{max}=2,35KN$  respectiv  $R_m=58,95Mpa$ , valori cu 28% mai mici față de probele Al1, Al2 și Al6 (tabelul 4.21).

Tabelul 4.21 Rezultatele încercării mecanice ale îmbinărilor aluminiu cu oțel galvanizat

Nr probă	Nr încercări	Dimensiuni sudura		$F_{\max}$ [KN]	$F_{\max,med}$ [KN]	$R_m$ [MPa]	$R_{m,med}$ [MPa]
		l [mm]	H [mm]				
Al1	1	20	2	3,08	3,16	77	79,10
	2	20	2	4,24		106	
	3	20	2	1,92		48	
	4	20	2	2,79		69,75	
	5	20	2	1,85		46,25	
	6	20	2	3,28		82	
	7	20	2	4,99		124,75	
Al2	1	20	2	1,86	3,05	46,5	76,25
	2	20	2	0,63		15,75	
	3	20	2	0,59		14,75	
	4	20	2	0,5		12,5	
	5	20	2	3,47		86,75	
	6	20	2	3,5		87,5	
	7	20	2	3,37		84,25	
Al3	1	20	2	2,23	2,35	55,75	58,95
	2	20	2	1,92		48	
	3	20	2	1,5		12,5	
	4	20	2	2,19		54,75	
	5	20	2	2,94		73,5	
	6	20	2	2,51		62,75	
Al6 (mecanizat)	1	18,6	2	3,37	3,58	90,59	91,36
	2	20	2	3,91		97,95	
	3	19,5	2	3,7		94,87	
	4	21,2	2	3,5		82,93	
	5	19	2	3,44		90,52	

Curbele caracteristice rezultate în urma încercării mecanice la tracțiune, pentru probele Al1, Al2, Al3, Al6 sunt prezentate în figurile 4.56, 4.58, 4.60 respectiv 4.62, iar aspectul probelor încercate este prezentat în figurile 4.57, 4.59, 4.61 respectiv 4.63.

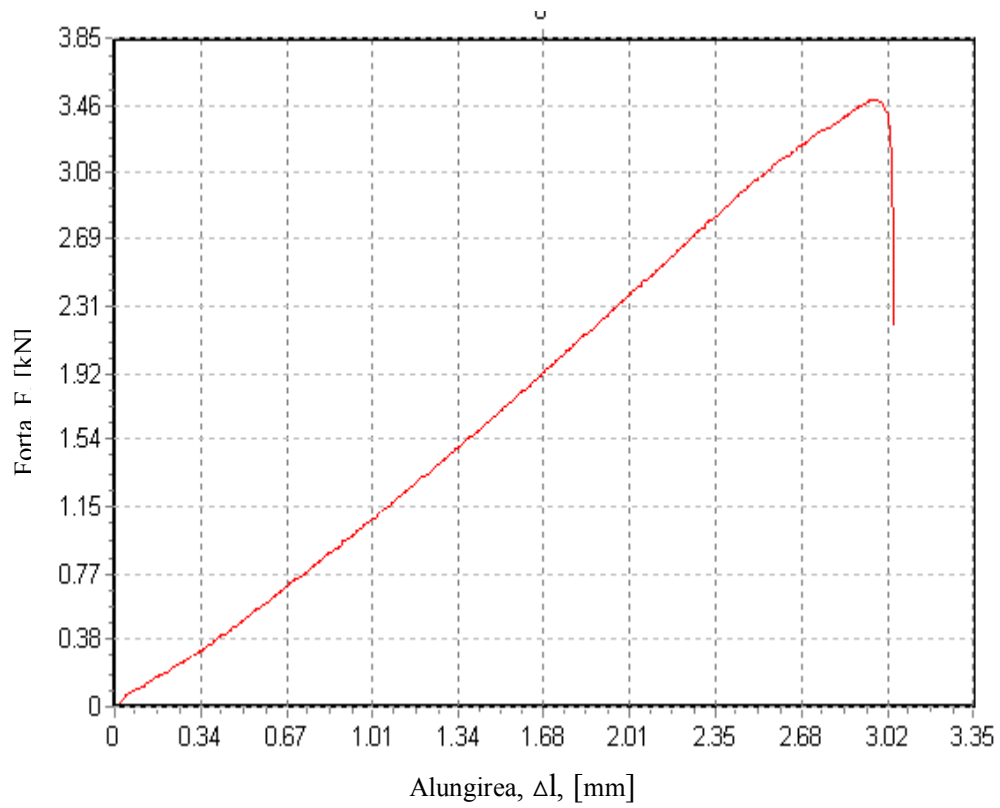


Fig. 4.56 Curba caracteristică pentru proba Al1

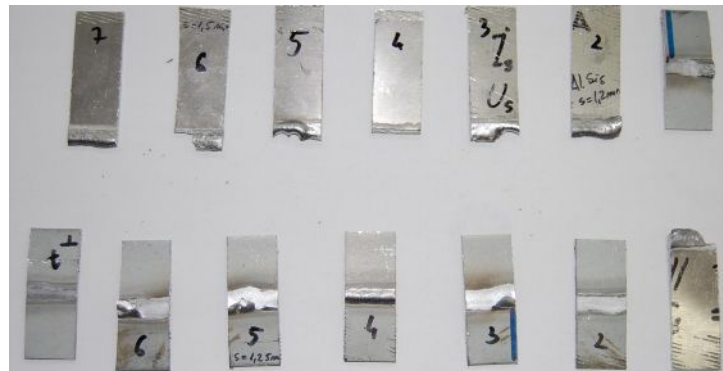


Fig. 4.57 Proba Al1

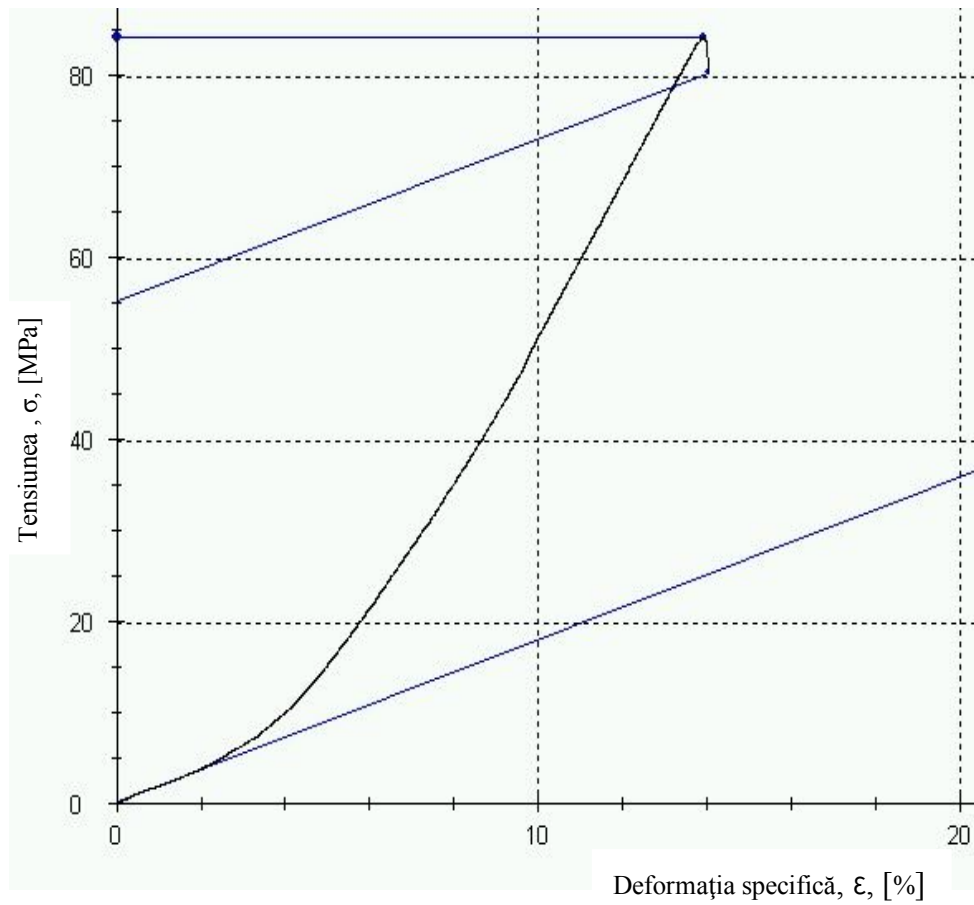


Fig. 4.58 Curba caracteristică pentru proba Al2



Fig.4.59 Proba Al2

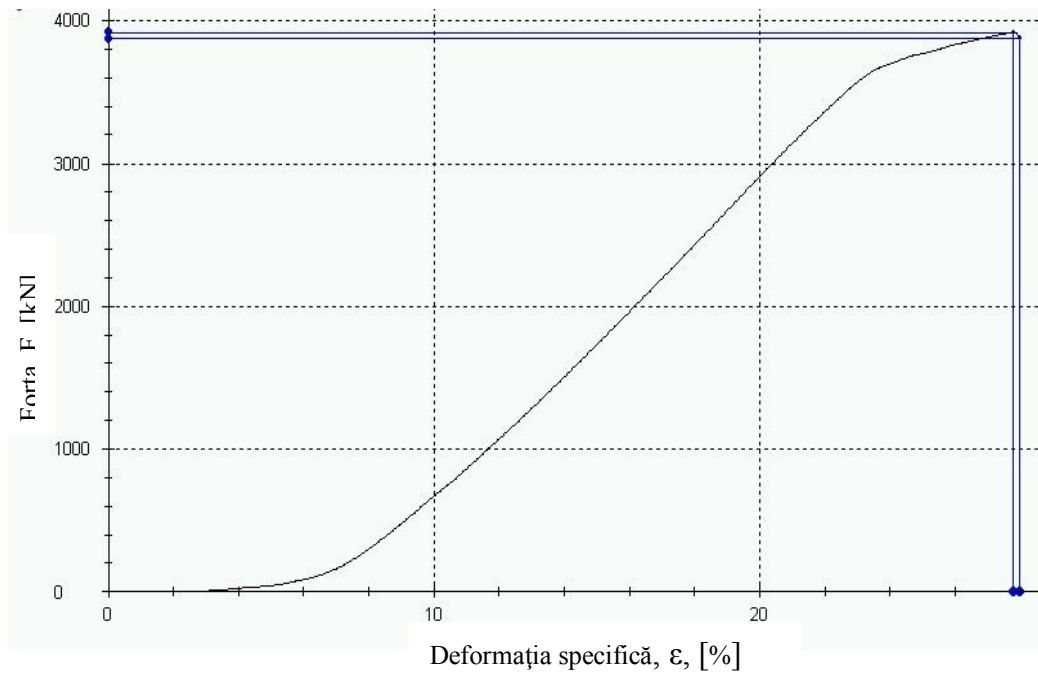


Fig. 4.60 Curba caracteristică pentru proba Al3



Fig. 4.61. Proba Al3

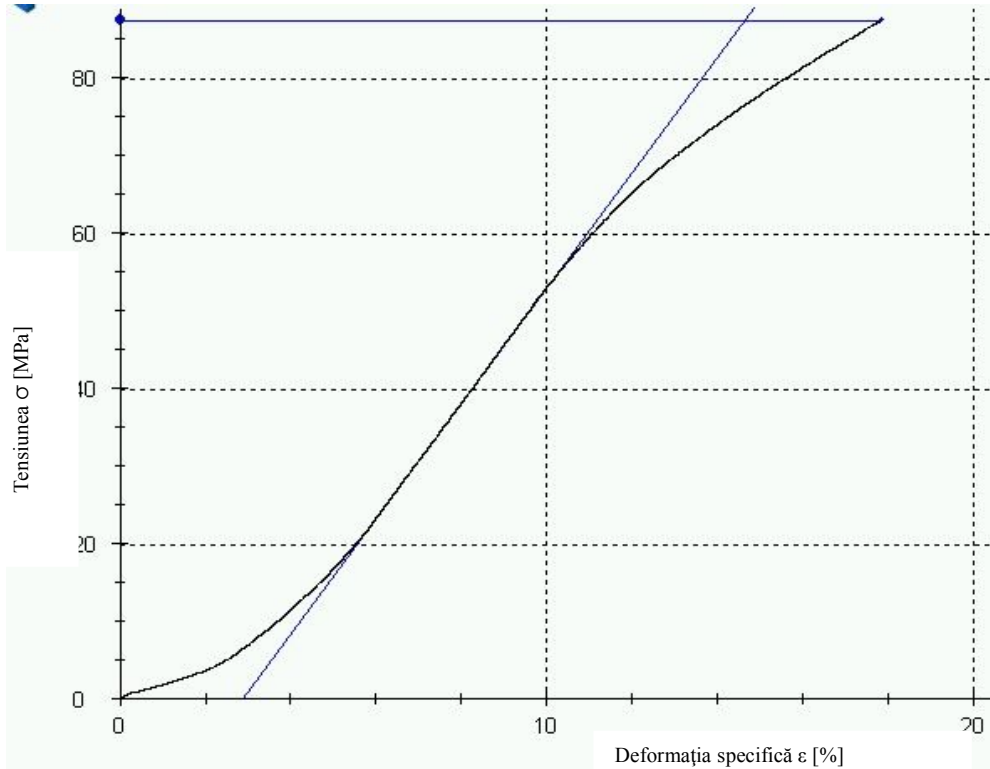


Fig. 4.62. Curba caracteristică pentru proba Al6

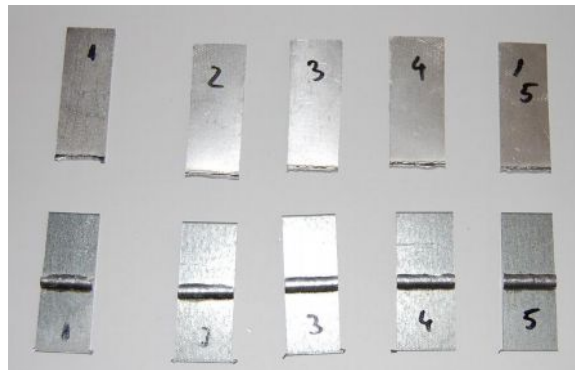


Fig. 4.63 Proba Al6

Analizarea rezultatelor obținute prin încercarea la tracțiune a îmbinărilor disimilare oțel galvanizat – aluminiu s-a efectuat prin compararea valorilor obținute și prin trasarea curbelor caracteristice fiecărei probe încercate. Cu toate că ruperea s-a produs în îmbinare s-a constata că rezultatele încercării sunt corespunzătoare, ca urmare procedeul de sudare cu aport termic scăzut MIG-CMT poate fi aplicat la îmbinarea oțelului cu aluminiu.

## 5. MODELAREA DISTRIBUȚIEI TENSIUNILOR LA ÎMBINAREA PRIN SUDOBRAZARE A OȚELURILOR ACOPERITE

### 5.1. Modelarea cu elemente finite a îmbinărilor sudobrazate din oțeluri galvanizate

Aprecierea rezistenței îmbinării, alături de încercările experimentale, s-a completat prin analiza cu elemente finite cu ajutorul programului COSMOS/M. Modelul urmărește să determine distribuțiile tensiunilor și deformațiilor, în elementele îmbinării, pentru diverse cazuri de încărcare.

Pentru generarea modelului geometric s-au definit:

- patru puncte cu, comanda PT
- 2 puncte cu, comanda PTGEN
- 1 suprafață cu, comanda SF2CR
- 1 volum cu, comanda VLEXTR
- 1 volum cu VLGEM (copiere cu translații)
- 1 volum cu comanda VLGRSF (cel care definește îmbinarea)

În total modelul este descris de 18 puncte, 32 curbe, 17 suprafețe și 3 volume.

Tipurile de elemente utilizate:

- SOLID cu 8 noduri pentru materialul de bază
- TETRA4 cu 4 noduri pentru îmbinare

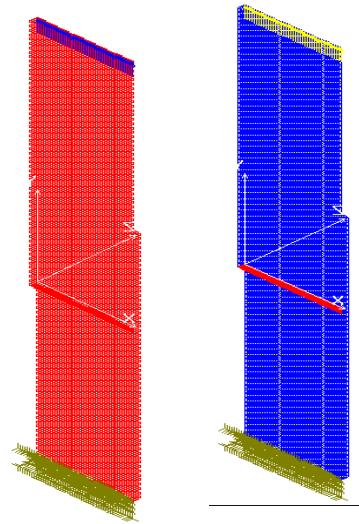


Fig. 5.1 Schematizarea discretizării modelului: a. nodurile modelului, b. elementele modelului

Proprietățile de material:

- tablă zincată:  $EX=2,1 \times 10^5$  MPa,  $\mu=0,3$  coeficientul lui Poisson
- îmbinare din CuSi3:  $EX=1,05 \times 10^5$  MPa;  $\mu=0,26$  coeficientul lui Poisson

Discretizarea celor 3 volume s-a realizat succesiv începând cu tabla zincată, după definirea proprietăților de material specifice fiecărei părți componente a îmbinării. Tabla zincată este descrisă de 9600 elemente volumice „solid” cu 8 noduri.

Îmbinarea descrisă geometric de volumul „3” s-a discretizat în 1800 elemente solid tip TETRA 4, elemente care au  $EX=1,05 \cdot 10^4$  MPa și  $\mu=0,26$

Pentru a se realiza o discretizare cât mai apropiată de modelul real numărul de elemente și dimensiunile fiecărui element s-au ales astfel încât să se poată realiza legarea nodurilor doar în zona îmbinării. Acest lucru s-a realizat prin selectarea nodurilor menționate mai sus cu comenzile:

- INITSEL, ND,1,1
- SELINP, ND, 19353, 20008,1,1
- SELINP, ND, 26569, 27224,1,1
- NMERGE,1, 500000, 1, 0.00001,0,0,0

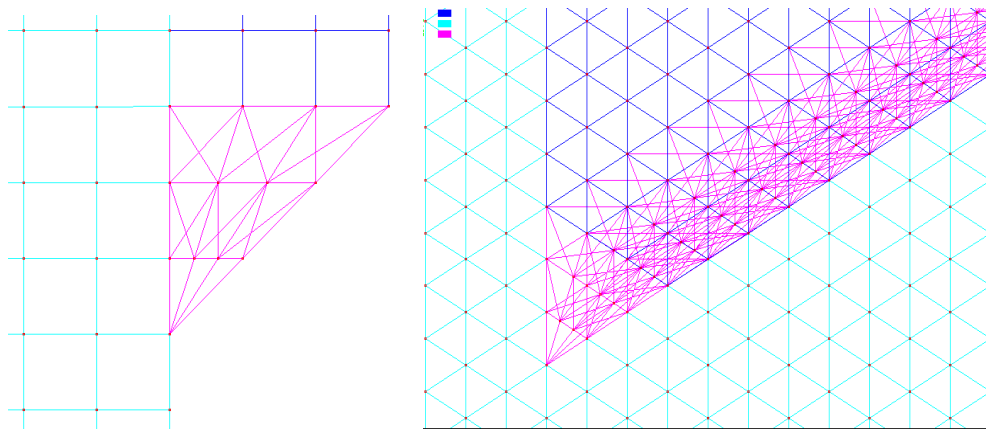


Fig. 5.2 Detalii privind discretizarea îmbinării:  
a. vedere în planul frontal, b. vedere în spațiu

În total au fost „legate” 574 noduri, numărul total de noduri reducându-se cu 287 după comanda NCOMPRES.

Numărul total de noduri rezultat este: 20295

Pentru realizarea solicitării de tracțiune impus deplasări nule pe toate direcțiile pentru nodurile aflate pe curba 17 care limitează partea inferioară a tablei zincate, muchie de pe aceeași față cu îmbinarea, comanda: DCR,17,AI,0,17,1. Forțele au fost aplicate pe nodurile de pe muchia superioară a tablei zincate, muchie



aflată în același plan vertical cu cea care are deplasările impuse nule comanda: FCR,8,FY,20,8,1.

Valoarea forței aplicate pe toate cele 41 noduri este 20 N, rezultând un total de 820 N.

Încărcarea și deplasările impuse sunt reprezentate în figura:1.

După realizarea modelului s-au specificat opțiunile necesare pentru realizarea analizei statice cu comenzile: - A\_STRESS,1,-1,1,1,1,0,0,0,1,1

- STRESS,1, și s-a efectuat analiza statică cu comanda R\_STATIC

Distribuțiile diferitelor componente ale tensiunilor, deplasărilor precum și deformată modelului sunt prezentate și valorile, în figurile 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 și 5.8.

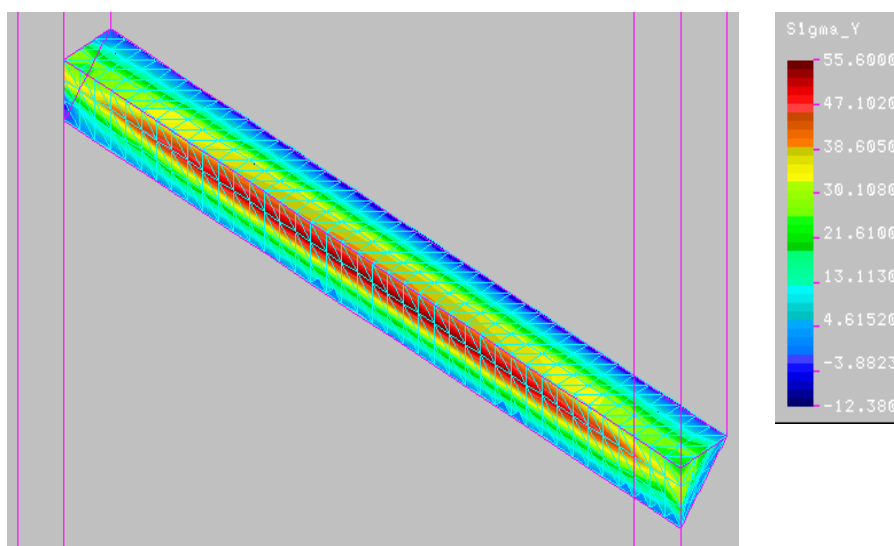


Fig. 5.3 Distribuția tensiunilor normale pe direcția forței în îmbinare

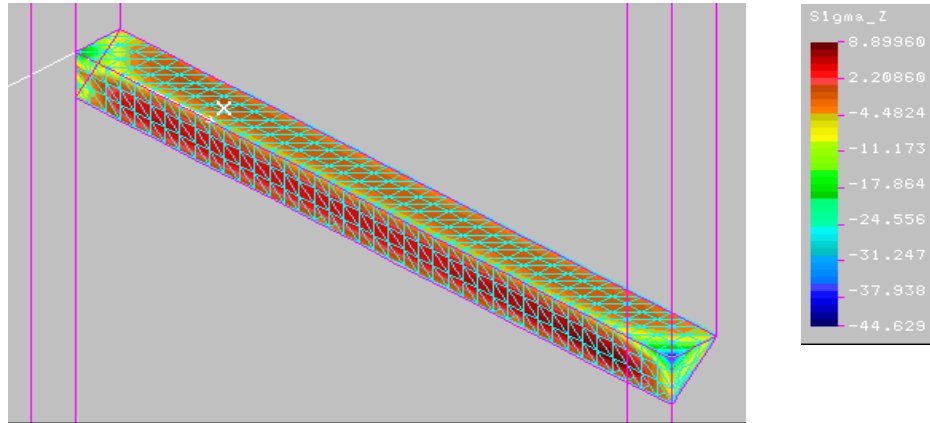


Fig. 5.4 Distribuția tensiunilor normale pe direcția perpendiculară pe direcția forței în îmbinare

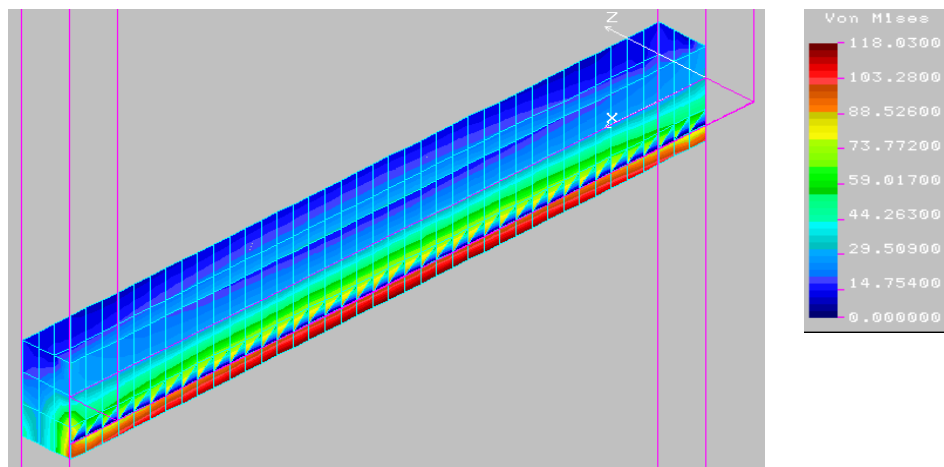


Fig. 5.5 Distribuția tensiunilor echivalente,  $\sigma_{ech(5)}$ , în materialul de bază

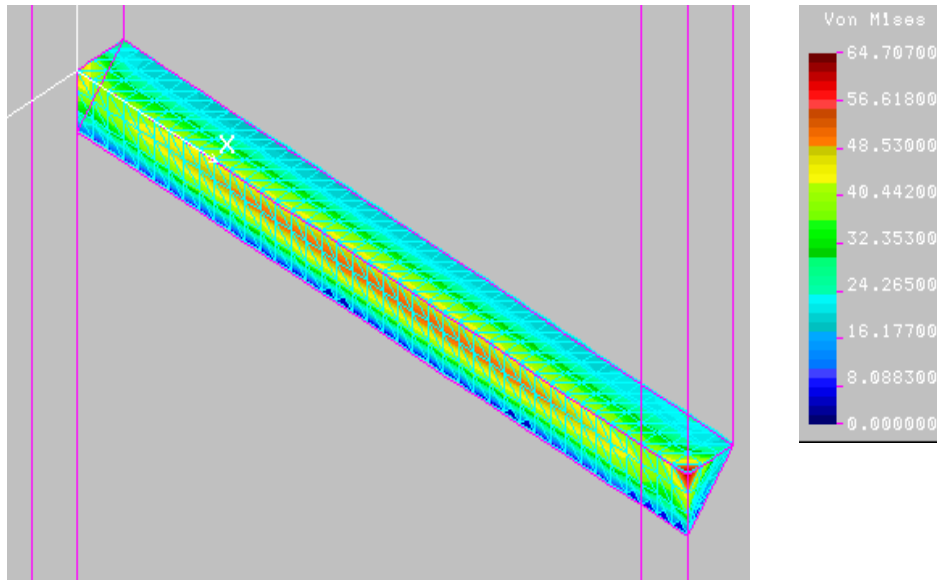


Fig. 5.6 Distribuția tensiunilor echivalente, după teoria a-V-a, în îmbinare

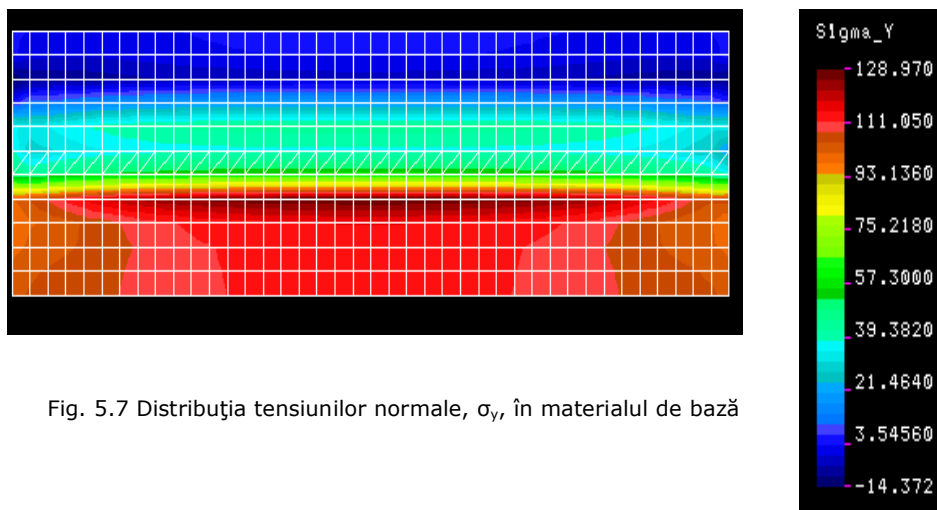


Fig. 5.7 Distribuția tensiunilor normale,  $\sigma_y$ , în materialul de bază

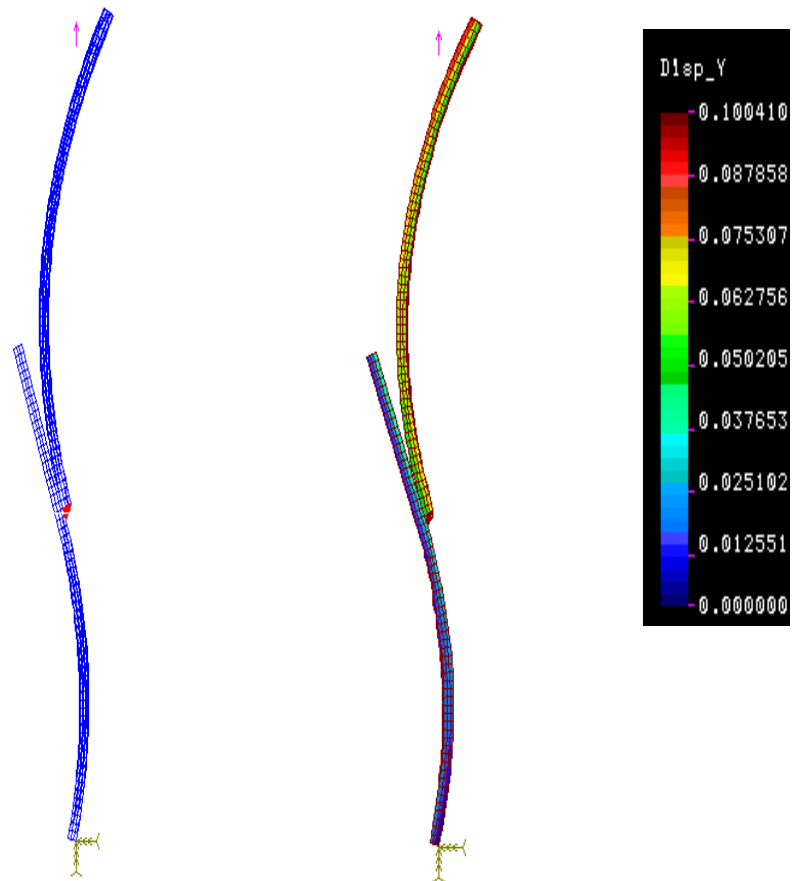


Fig. 5.8 Deformata modelului și distribuția deplasărilor pe direcția forței

În urma efectuării analizei programul a furnizat rezultatele cerute prin comanda A\_STRESS într-un fișier cu extensia \*.out., fișier al cărui rezumat este prezentat în Anexa 1.

În Anexa 3 este dat și fișierul în care se poate repeta experimentul, fișier care are extensia \*.ses.

Modelarea efectuată pe îmbinările sudobrazate dintre oțel galvanizat și aluminiu a urmărit să determine distribuția tensiunilor și deformațiilor în elementele îmbinării pentru o anumită forță de încercare. Pentru diverse alte cazuri de încărcare distribuția tensiunilor și deplasărilor este similară, diferă doar valorile acestora care au o variație liniară funcție de forța de încercare.

## 5.2. Modelarea cu elemente finite a îmbinărilor disimilare dintre oțel galvanizat - aluminiu

Analiza cu elemente finite cu ajutorul programului COSMOS/M s-a efectuat și pentru studiul rezistenței dintre oțel galvanizat - aluminiu ca bază corespunzătoare încercărilor experimentale. Modelul urmărește să determine distribuțiile tensiunilor și deformațiilor, în elementele îmbinării, pentru diverse cazuri de încărcare.

Pentru generarea modelului geometric s-au definit:

- patru puncte cu, comanda PT;
- 2 puncte cu, comanda PTGEN;
- 1 suprafață cu, comanda SF2CR;
- 1 volum cu, comanda VLEXTR;
- 1 volum cu VLGEM (copiere cu translații);
- 1 volum cu comanda VLCRSF (cel care definește îmbinarea);

În total modelul este descris de 18 puncte, 32 curbe, 17 suprafețe și 3 volume.

Tipurile de elemente utilizate:

- SOLID cu 8 noduri pentru materialul de bază
- TETRA4 cu 4 noduri pentru sudură

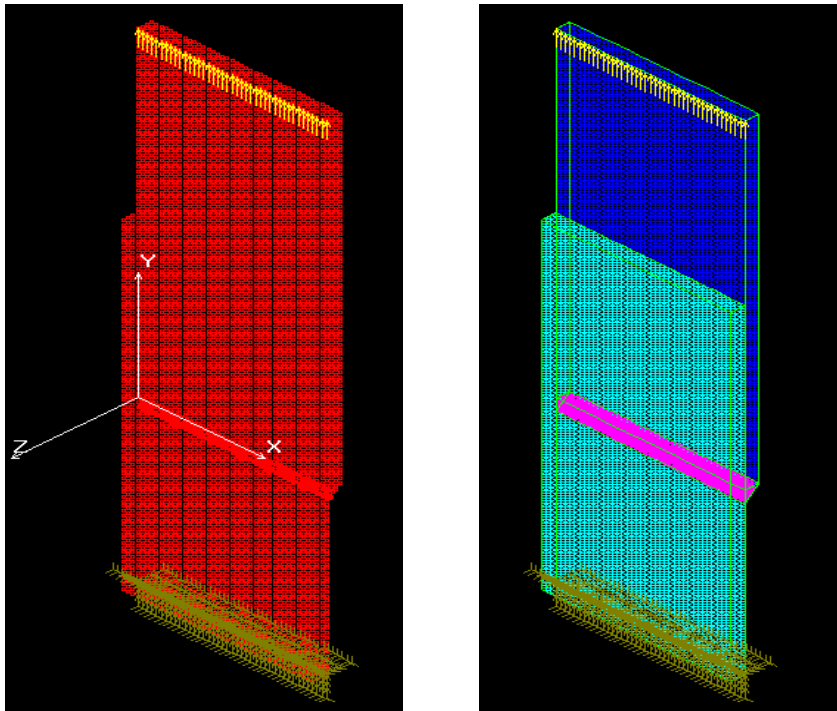


Fig. 5.9. Schematizarea discretizării modelului:  
a. nodurile modelului b. elementele modelului

Proprietățile de material:

- tablă zincată:  $E_X = 2,1 \cdot 10^5$  MPa,  $\mu = 0,3$  coeficientul lui Poisson
- tablă din AlMg :  $E_X = 7 \cdot 10^4$  MPa,  $\mu = 0,24$  coeficientul lui Poisson

Discretizarea celor 3 volume s-a realizat succesiv începând cu tabla zincată, după definirea proprietăților de material specifice fiecărei părți componente a îmbinării. Tabla zincată este descrisă de 9600 elemente volumice „solid” cu 8 noduri. Pentru tabla din AlMg s-au utilizat alte 9600 elemente (de la 9600 până la 19200), elemente SOLID care au  $E_X = 7 \cdot 10^4$  MPa și  $\mu = 0,24$ .

Îmbinarea sudată, descrisă geometric de volumul „3” s-a discretizat în 1800 elemente solid tip TETRA 4, elemente care au  $E_X = 1,05 \cdot 10^4$  MPa și  $\mu = 0,26$

Pentru a se realiza o discretizare cât mai apropiată de modelul real numărul de elemente și dimensiunile fiecărui element s-au ales astfel încât să se poată realiza legarea nodurilor doar în zona îmbinării. Acest lucru s-a realizat prin selectarea nodurilor menționate mai sus cu comenzile:

- INITSEL, ND,1,1
- SELINP, ND, 19353, 20008,1,1
- SELINP, ND, 26569, 27224,1,1
- NMERGE,1, 500000, 1, 0.00001,0,0,0

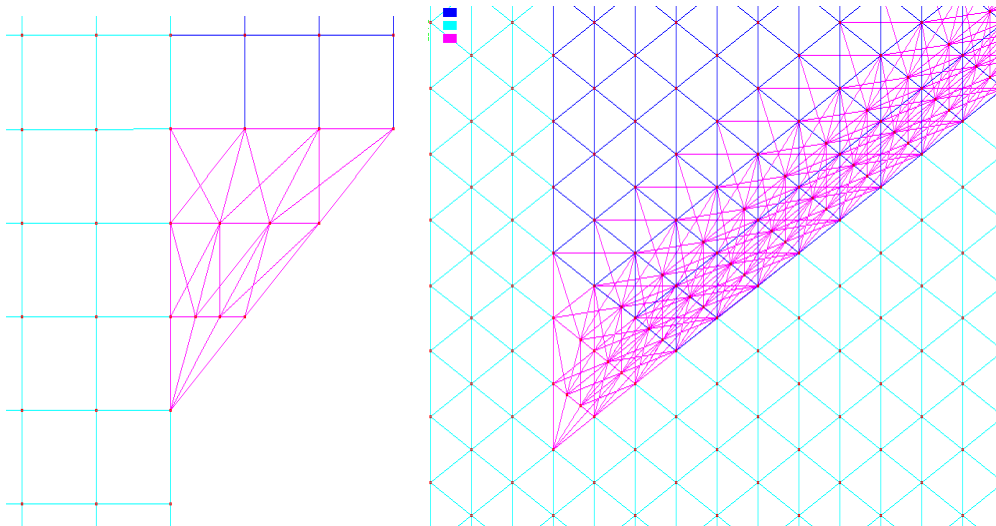


Fig. 5.10. Detalii privind discretizarea îmbinării:  
a. vedere în planul frontal, b. vedere în spațiu

În total au fost „legate” 574 noduri, numărul total de noduri reducându-se cu 287 după comanda NCOMPRES.

Numărul total de noduri rezultat este: 26773

Pentru realizarea solicitării de tracțiune impus deplasări nule pe toate direcțiile pentru nodurile aflate pe curba 17 care limitează partea inferioară a tablei de AlMg, muchie de pe aceeași față cu îmbinarea sudată, comanda: DCR,17,Al,0,17,1. Forțele au fost aplicate pe nodurile de pe muchia superioară a tablei zincate, muchie aflată în același plan vertical cu cea care are deplasările impuse nule comanda: FCR,8,FY,20,8,1.

Valoarea forței aplicate pe toate cele 41 noduri este 20 N, rezultând un total de 820 N.

Încărcarea și deplasările impuse sunt reprezentate în figura 6.19.

După realizarea modelului s-au specificat opțiunile necesare pentru realizarea analizei statice cu comenzile: - A\_STRESS,1,-1,1,1,1,0,0,1,1

- STRESS,1, și s-a efectuat analiza statică cu comanda R\_STATIC

Distribuțiile diferitelor componente ale tensiunilor, deplasărilor precum și deformată modelului sunt prezentate cu valorile respective, în figurile 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 și 5.15.

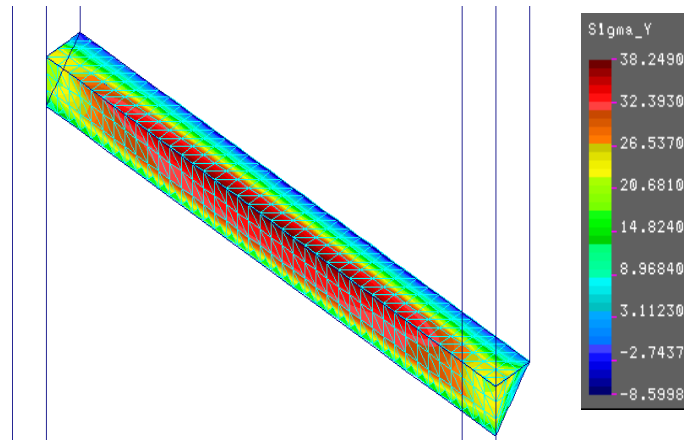


Fig. 5.11. Distribuția tensiunilor normale în îmbinare pe direcția forței

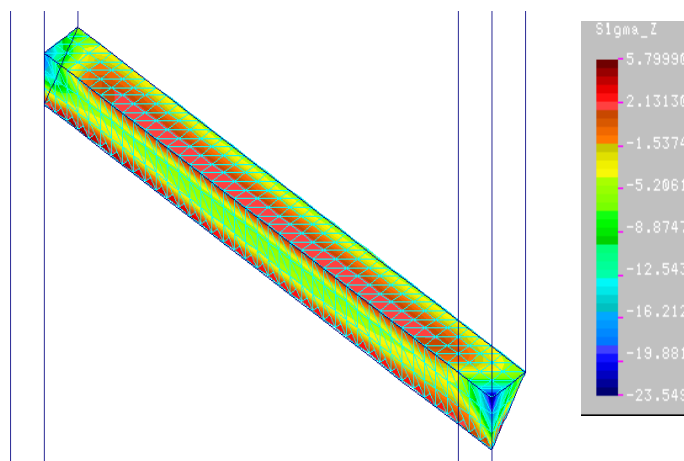


Fig. 5.12 Distribuția tensiunilor normale în îmbinare pe direcția perpendiculară forței



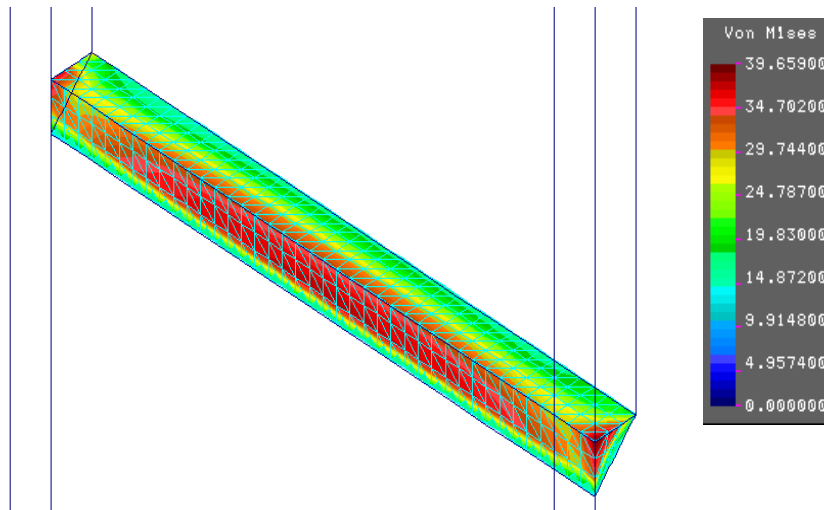


Fig. 5.13 Distribuția tensiunilor echivalente în îmbinare, după teoria a-V-a

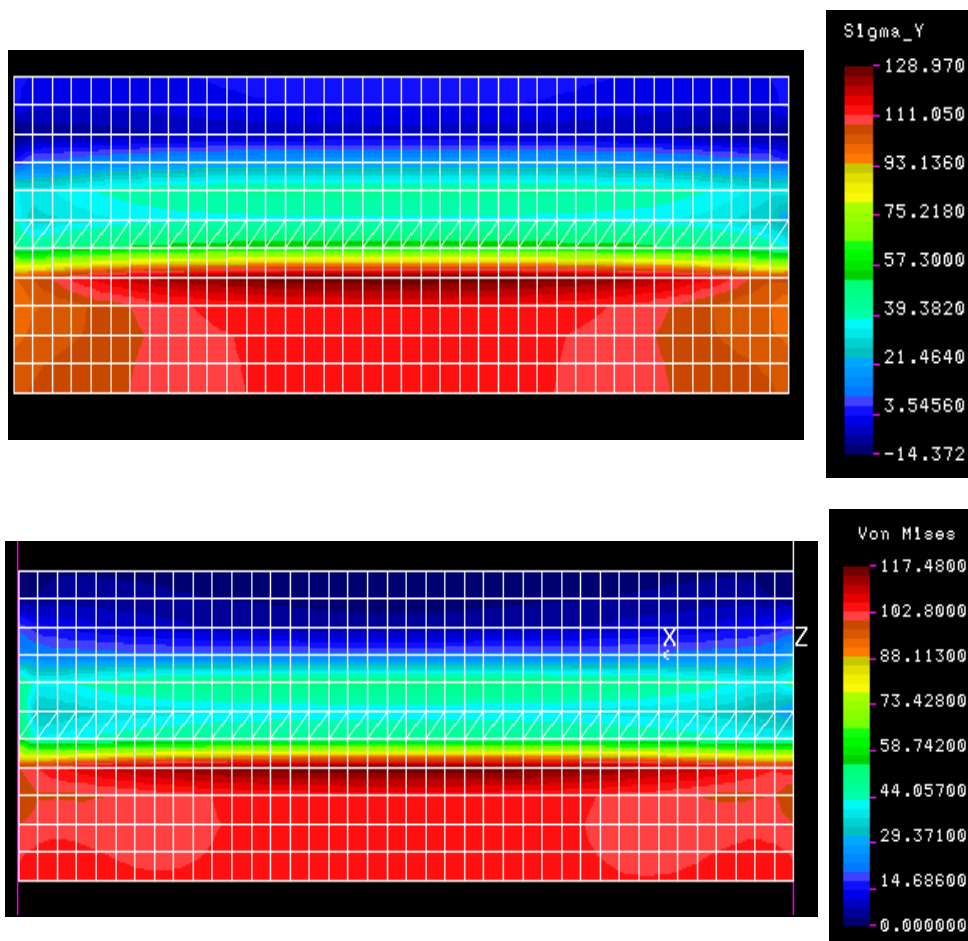


Fig. 5.14 Distribuția tensiunilor normale în îmbinare  $\sigma_y$ , și echivalente,  $\sigma_{ech(5)}$

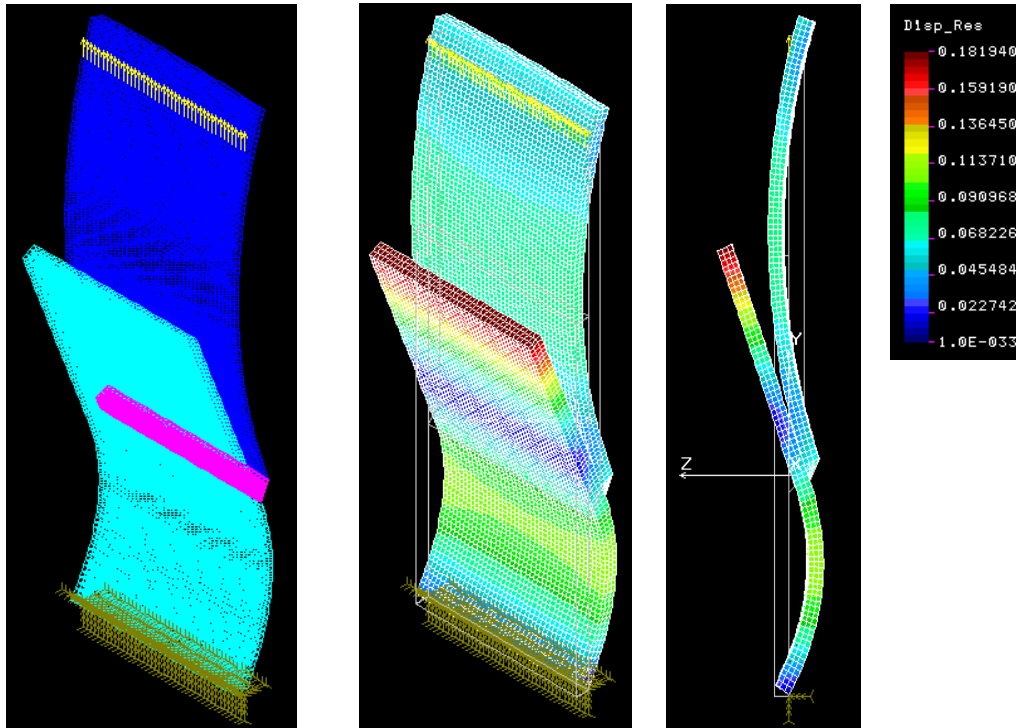


Fig. 5.15 Deformata modelului și distribuția deplasărilor pe direcția forței

În urma efectuării analizei programul a furnizat rezultatele cerute prin comanda A\_STRESS într-un fișier cu extensia \*.out., fișier al cărui rezumat este prezentat în Anexa 2.

În Anexa 4 este dat și fișierul cu comenzile cu care se poate repeta experimentul (\*.ses).

Modelarea efectuată pe îmbinările sudobrazate dintre oțel galvanizat și aluminiu a urmărit să determine distribuția tensiunilor și deformațiilor în elementele îmbinării pentru o anumită forță de încercare. Pentru diverse alte cazuri de încărcare distribuția tensiunilor și deplasărilor este similară, diferă doar valorile acestora care au o variație liniară funcție de forța de încercare.

## 6. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Tendențele actuale din domeniul construcțiilor metalice, în special cea a construcțiilor de automobile, de a găsi noi materiale prin care să se prelungească durata de viață a produselor, au contribuit la dezvoltarea echipamentelor și tehnologiilor de îmbinare cu ajutorul cărora se poate realiza îmbinarea acestor materiale.

O posibilitate de creștere a duratei de viață și a calității produselor metalice este protecția oțelurilor prin acoperirea cu materiale anticorozive. Această modalitate conduce la creșterea duratei de viață a produselor metalice de cca. 2 ori.

O problemă importantă în realizarea structurilor din astfel de materiale o reprezintă optimizarea proceselor/procedeelor de îmbinare a oțelurilor acoperite.

Cercetările dezvoltate în cadrul tezei au demarat printr-o documentare elaborată și actuală ce a permis sintetizarea aspectelor legate de tipurile de oțeluri acoperite, metode de obținere, dar și domeniile de aplicabilitate.

Posibilitățile de obținere a oțelurilor acoperite sunt: acoperirea prin imersare în metal topit, acoperirea prin pulverizare termică, acoperirea prin sudare, acoperirea din stare solidă, acoperirea prin difuziune termică, acoperirea electrochimică. Între acestea se remarcă acoperirea electrochimică sub aspectul accesibilității tehnologice și cel al obținerii unor straturi acoperitoare subțiri și uniforme care conferă oțelului proprietăți anticorozive.

Posibilitățile actuale utilizează diverse metale pentru statul acoperitor: zinc, cupru, cadmiu, aluminiu, nichel, crom în cazul oțelurilor. Cercetările efectuate în cadrul tezei de doctorat au arătat sub că aspectul costurilor, duratei de viață și protecției anticorozive cel mai utilizat/recomandat material pentru acoperirea oțelului este zincul.

Cercetările efectuate au fost îndreptate în principal spre posibilitățile de îmbinare ale oțelurilor galvanizate. Abordarea problematicii s-a făcut în contextul în care oțelurile acoperite, galvanizate și îmbinările acestora sunt preocupări de ultimă oră din literatura de specialitate.

Particularitățile care apar la îmbinarea oțelurilor acoperite prin galvanizare cu zinc a constituit un alt reper al cercetărilor. Procedeele de sudare a oțelurilor acoperite prin galvanizare au fost tratate în lucrare cu recomandări și tehnologii de sudare referitoare la posibilitatea obținerii unor îmbinări de calitate.

Din cercetările efectuate soluția optimă de îmbinare a oțelurilor galvanizate a rezultat a fi sudobrazarea. Se preferă această variantă de îmbinare deoarece aportul de căldură în zona îmbinării este mic. Acest aport termic scăzut conduce la faptul că straturile superficiale în speță cel obținut prin zincare sunt puțin expuse

deteriorării, deformarea pieselor este de asemenea mică, modificările structurale din îmbinare sunt reduse.

S-au analizat în continuare particularitățile care recomandă îmbinarea prin sudobrazare a oțelurilor galvanizate, respectiv aspectele metalurgice legate de sudobrazarea acestor materiale. Cele întreprinse au permis sintetizarea datelor referitoare la procedeele îmbinarea prin sudobrazare, materialele de adaos utilizate, evidențiindu-se aspectele tehnologice legate de sudobrazarea oțelurilor acoperite;

Din gama procedeele de sudobrazare procedeele selectate în cadrul tezei de doctorat au fost sudobrazarea MIG în curent pulsant, sudobrazarea cu aport termic scăzut MIG-CMT, sudobrazarea WIG – varianta TOPTIG, sudobrazarea hibridă laser - MIG.

În completarea celor prezentate s-au efectuat cercetări experimentale privind posibilitatea realizării de îmbinări disimilare dintre oțel galvanizat și aluminiu.

Încercările experimentale efectuate în cadrul lucrării s-au realizat pe table din oțel acoperit cu zinc realizate la firma Westmetal SRL Timișoara, respectând procesul tehnologic uzual la care s-a intervenit asupra densității de curent pentru a obține straturi de zinc de grosime uniformă.

Etapa următoare în cadrul cercetărilor s-a referit la realizarea de îmbinări specifice utilizând ca material de bază probele acoperite prin zincare la firma Westmetal SRL, tehnologiile de îmbinare fiind proiectate și realizate în cadrul laboratoarelor din catedră.

Tehnologiile de sudobrazare realizate au fost efectuate cu echipamentele de sudare: MIG/MAG –PHOENIX 300 produs de firma EWM Hightech Welding, Trans Puls Synergic 2700 CMT produs de firma Fronius.

Certificarea calității îmbinărilor realizate și oportunității de utilizare a procedurii de sudobrazare MIG, a necesitat testarea probelor experimentale. Probele experimentale au fost supuse unui program complex de încercări specific pentru astfel de îmbinări nedemontabile.

Programul de încercări a constat din:

- Analize microscopice efectuate cu microscopul OLYMPUS Bx51M și cu microscopul OLYMPUS CX41 la mărimi de 50-100x pentru analiza structurii materialului de bază utilizat și a îmbinării realizate;
- Analize sclerometrice cu ajutorul microdurimetrului PMT3, ce au permis stabilirea durtății materialului în zonele îmbinate în varianta mecanizată și manuală
- Încercări de tracțiune pe probele îmbinate, încercările confirmând avantajele folosirii procedurii de sudobrazare cu aport termic scăzut MIG-CMT la îmbinarea oțelurilor galvanizate comparativ cu procedeele clasice de îmbinare prin sudare;

Toate aceste încercări metalografice și mecanice au fost efectuate conform standardelor europene în vigoare, respectiv SR EN 1321:2000, SR EN 1043-1:1997, SR EN 895:1995;

- Analiza termogravimetrică realizată cu un aparat de analiză termică METTLER pentru determinarea purității probelor experimentale din oțel galvanizat, precum și a reacțiilor de descompunere termică ce apar odată cu creșterea temperaturii. Totodată prin analiza termodiferențială se pot observa reacțiile în fază solidă dintre fier și zinc, precum și fenomenele exotermice sau endotermice.

- Încercarea la rezistență în ceață salină efectuată conform standardului EN ISO 9227:2006 cu instalația LIEBISCH SL-400 existentă la Fachhochschule Gelsenkirchen din Germania. Încercarea de rezistență în ceață salină permite observarea modificării rezistenței la coroziune în urma aplicării procedurii de îmbinare MIG-CMT.

Programele de încercări au fost desfășurate pe îmbinări sudate și sudobrazate cu mai multe variante de materialele de adaos, prin modificarea parametrilor tehnologici pentru obținerea tehnologiilor optime de îmbinare.

Modelarea cu elemente finite a îmbinărilor sudobrazate din oțeluri galvanizate și a îmbinărilor disimilare oțel galvanizat – aluminiu a urmărit determinarea distribuțiilor tensiunilor și deformațiilor, în elementele îmbinării. Modelarea a apelat la un soft specializat prin care se apreciază rezistența acestor îmbinări

Rezultatele parțiale obținute, periodic au fost făcute public prin participarea la conferințe naționale și internaționale, respectiv prin publicare de articole în reviste de prestigiu din țară și străinătate.

Se apreciază că principalele **contribuții originale/personale** relevante rezultate în urma cercetărilor efectuate în cadrul tezei de doctorat următoarele:

- Realizarea oțelurilor acoperite prin galvanizare cu zinc. Probele au fost realizate la firma Westmetal SRL Timișoara. S-a reușit realizarea unor straturi de zinc uniforme și fără întreruperi prin alegerea adecvată a parametrilor de galvanizare și a fluxului tehnologic. Probele s-au realizat din oțel obișnuit acoperit prin galvanizare cu zinc și au putut fi utilizate în cercetările efectuate pentru evidențierea procedurilor optime de îmbinare;

- Inventarierea metodelor de îmbinare a oțelurilor acoperite prin galvanizare. Au fost selectate procedeele de sudare și sudobrazare, recomandări tehnologice prescrise permițând realizarea îmbinării oțelurilor galvanizate și a îmbinărilor disimilare oțel galvanizat-aluminiu;

- Evidențierea procedurii de sudobrazare a oțelurilor galvanizate, în diverse variante prin relevarea avantajelor acestui procedeu comparativ cu îmbinarea prin sudarea. Între procedeele de îmbinare s-a stabilit ca optim procedeu de sudobrazare cu aport termic redus MIG-CMT. Procedeu conduce la alterarea minimă a stratului acoperitor, modificări structurale minime în îmbinare asigurând capacitate portantă optimă;

- Tot ca o contribuție personală se consideră realizarea programului experimental pentru diverse variante de îmbinare, cu diverse materiale de adaos. S-au efectuat încercări prin procedeul de sudobrazare MIG în curent pulsant cu materialele de adaos: sârma din CuAl8 și sârma CuSi3 folosind gazul de protecție argon sau Ar+2,5%CO<sub>2</sub>. Deosebite au fost rezultatele obținute prin sudobrazare cu aport termic scăzut MIG-CMT la care s-a utilizat materialul de adaos: sârma din CuSi3 și gazul de protecție argon sau Ar+30%He+1%CO<sub>2</sub>. În urma cercetărilor efectuate procedeul de sudare cu aport termic scăzut MIG-CMT se recomandă la îmbinarea disimilară oțel galvanizat-aluminiu;

- Stabilirea tehnologiilor optime de îmbinare ca urmare a cercetărilor experimentale au fost dezvoltate pe îmbinări sudobrazate MIG în curent pulsant și sudobrazare cu aport termic scăzut MIG-CMT în variantă manuală și mecanizată;

- Realizarea programului experimental de verificare a calității îmbinărilor realizate. În acest scop s-au efectuat analize metalografice, încercări de duritate, încercări de tracțiune și încercări de rezistență la coroziune a îmbinărilor sudobrazate din oțeluri galvanizate. Analizele metalografice au evidențiat structura metalului de bază, a defectelor din îmbinare, a uniformității și continuității stratului de zinc. Rezultate remarcabile au fost obținute la îmbinarea prin sudobrazare MIG-CMT unde nu s-au remarcat modificări structurale semnificative ale materialului de bază, iar stratul de zinc de la suprafață nu a fost deteriorat. Încercările de duritate au arătat că duritatea este mai mare în cazul sudobrazării mecanizate deoarece încălzirea materialului s-a produs pe o zonă mai mică, iar răcirea este mai rapidă, structura rezultată fiind mai fină. Prin încercările de tracțiune s-a arătat că rezistența mecanică a îmbinărilor realizate prin sudobrazare MIG-CMT a fost corespunzătoare, ruperea având loc, la majoritatea probelor, în materialul de bază. Încercările de rezistență la coroziune în ceață salină au arătat că la îmbinarea oțelurilor galvanizate prin procedeul de sudobrazare MIG-CMT, stratul de zinc se deteriorează foarte puțin și protecția anticorozivă nu este afectată;

- Modelarea cu elemente finite a îmbinărilor sudobrazate din oțeluri galvanizate și a îmbinărilor disimilare oțel galvanizat – aluminiu. Modelarea respectivelor îmbinări a permis determinarea distribuțiilor tensiunilor și deformațiilor, în elementele îmbinării. S-a dovedit că tensiuni și deformații minime sunt obținute în urma metodelor de îmbinare aplicate.

**Ca direcții de cercetare pentru viitor se sugerează:**

- extinderea investigațiilor asupra caracteristicilor îmbinărilor astfel realizate pentru fundamentarea în mod obiectiv a domeniilor și condițiilor de aplicare efectivă a acestor procedee;

- realizarea unei comparații între ciclurile termice apărute din multitudinea de procedee de îmbinare;

- realizarea unor programe experimentale similare utilizând alte variante moderne de îmbinare a tablelor galvanizate prezentate în prezenta lucrare de doctorat;
- dezvoltări de modelări pe alte tipuri de încercări.

## BIBLIOGRAFIE

1. AKHTER, R., STEEN M, WATKINS KG: Welding zinc-coated steel with a laser and the properties of the weldment, J Laser Appl 3, 1991, pp. 9–20
2. ALENIUS, M., POHJANNE, M., SOMERVUORI, M., HANNINEN, H.: Exploring the mechanical properties of spot welded dissimilar joints for stainless and galvanized steels, Welding Journal, december 2006, vol. 85, nr.12, pp. 305s-313s ISSN 0043-2296
3. ANGEKER, M.: The new revolution of digital GMA welding, Schweiss und Prüftechnik, 2004, nr. 11. pp. 137-139
4. AYRES, K.R., HILTON, P.A.: CO<sub>2</sub> laser butt welding of coated steels for the automotive industry, Welding & Metal Fabrication, January 1994, p. 10-12
5. BRUCKNER, J.: The CMT process a revolution in welding technology, African Fusion, Supplement to Mechanical Technology, 2007, may, pp. 22-27
6. BRUCKNER, J, HACKL, H.: Der Cold Metal Transfer (CMT) - Prozess. 10. Internat. Aachener Schweisstechnik Kolloquium- Schweisstechnik und Füge-technik, 24-25.10.2007, Aachen, pp.477-490.
7. BRUCKNER, J., HIMMELBAUER, K; HACKL, H.: The CMT process and its possible applications, especially joining of steel with aluminium, DVS Berichte, nr. 231, 7 – th International Conference, Aachen, 15–17 june, 2004
8. BRUCKNER, J.: CMT [Cold Metal Transfer] process- a revolution in welding technology, Welding and Related Inspection Technologies, Proceedings, SOUTH Africa, 2006, pp. 13-16
9. BRUCKNER, J.: Cold metal transfer has a future joining steel to aluminium, Welding Journal, 2005, vol. 84, m. 6, pp. 38-40
10. BRUCKNER, J.: Cold metal transfer has a future joining steel to aluminium. The Sheet Metal Welding Conf. XI, Sterling Heights, Michigan, USA, may 11-14, 2004.
11. BRUCKNER, J.: Cold Metal Transfer of steel and Al–joining–process and its possibilities, Eurojoin 5, Proceedings, 2004, pp.8
12. CHEN, W; ACKERSON, P; MOLIAN, P.: CO<sub>2</sub> laser welding of galvanized steel sheets using vent holes, Materials & Design, Volume: 30 Issue: 2, pp. 245-251 Published: 2009



13. CHEN, Y.C. ș.a.: Role of zinc coat in friction stir lap welding Al and zinc coated steel, *Materials Science and Technology*, 2008, vol. 24, nr.1, pp. 33-39, ISSN: 0267-0836
14. DESOUZA, K.M.,: ASTM Prohesion Test Predicts Service Performance of Prepainted Steel Sheet Galvatech'04 Conference, Chicago, IL, April 4-8, 2004, ISSN 0197-2618
15. EASTERLING, K.: *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*, 2nd Ed., London, Butterworth-Heinemann, 1992.
16. FAES K., VERSTRAETEN B., BROECKX K.: Un, rendement accru grâce aux procédés de sondage novateurs, *Metallerie*, 2006, vol. 95, pp.105
17. FENG, J. C., HE P., HACK H.: Distribution of Zn and interfacial microstructure of braze-welding CMT joints between aluminium and galvanized steel sheets, *Solid State Phenomena*, 2007, vol. 127, pp. 43-48, ISSN 1012-0394
18. FENG, JC; HE, P; HACKL, H.: Distribution of Zn and interfacial microstructure of braze-welding CMT joints between alurniniurn and galvanized steel sheets, *International Workshop on Designing of Interfacial Structures in Advanced Materials and Their Joints*, Date: MAY 18-20, 2006 Osaka JAPAN  
Source: *Designing of Interfacial Structures in Advanced Materials and their Joints* Volume: 127, pp. 43-48, Published: 2007
19. FLEGEL, H.: Trend of Joining in the Automotive Industry. Proc. 10.Internat. Aachen Welding Conference, 24-25.10.2007, Aachen, pp.17-28
20. FORTAIN, I.M., RIMANO, L., VAIDYA, V.: Top-Tig – el procedimiento innovador que mejora la soldadura de piezas de chapa fina, *Revista de la Soldadura* ano XIX, nr.10, 2008, pp. 12-19, ISSN 1130-0820
21. FUJITA, S., MIZUNO, D.: Corrosion and corrosion test methods of zinc coated steel sheets on automobiles, *Corrosion Science*, Volume 49, Issue 1, January 2007, pp. 211-219, ISSN 0010-938X
22. GRAF, T.; STAUFER, H.: *LaserHybrid at Volkswagen*. IIW-Doc. XII-1730-02
23. GRANJON, H.: *Fundamentals of Welding Metallurgy*. Cambridge, England, Abington Publishing/Woodhead Publishing, 1991.
24. HALDENWANGER, H.; SCHMID, G.; KORTE, M.; BAYERLEIN, H.: *Laserstrahlhartlöten fürKarosseriesichtteile in Class-A-Oberflächenqualität*. DVS 204, S.191-196.
25. HENDRIK, R., s.a: *ESAB pulse gas-shielded metal arc brazing of surface coating sheets*, *Svetsaren*, 2000 no.3.
26. HIMMELBAUER, K.: The CMT processes – a revolution in welding technology, *Sudura-ASR*, Timisoara, nr. 3/2007, pp.4-11.

27. HORNING, H.: Fügen von Aluminium im modernen Automobilleichtbau. 10. Internat. Aachener Schweisstechnik Kolloquium- Schweisstechnik und Füge-technik, 24-25.10.2007, Aachen, pp. 329-348
28. HOWARD, B.C.: Welding galvanized steel. The World of Welding, Winter 1997-98, p. 5-6 IIW-m-837-86, pp.1-17;
29. IORDACHESCU, D., QUINTINO, L., DUARTE, J.: Metal transfer modes in automate MIG brazing, EWF International Conference EUROJOIN 5, 13-15 may 2004, Vienna, Austria
30. IORDACHESCU, D., QUINTINO, L., MIRANDA, R., PIMENTA, G.: Influence of shielding gases and process parameters on metal transfer and bead shape in MIG brazed joints of the tin coated steel plates, Materials and design, Elsevier, 2005, ISSN 0261-3069
31. IORDACHESCU, M., SCUTELNICU, E., QUINTINO, L.: Influența gazelor de protecție în procesul de brazare MIG, Conferința Internațională ASR – Timișoara 26-28 septembrie, 2007 pp. 9-20, ISSN 1843-4738
32. IQBAL, S; GUALINI, MMS; GRASSI, F.: Laser welding of zinc-coated steel with tandem beams: Analysis and comparison, Journal Of Materials Processing Technology Volume: 184, Issue: 1-3, pp. 12-18, Published: APR 12 2007
33. JOSEPH, A., WEBB, C., HARAMIA, M., YAPP, D.: Variable polarity improves Weld and brazing of galvanized sheet, Welding Journal, 2008, pp. 54
34. JOSEPH, A.: Variable polarity improves weld brazing of galvanized steel, Welding Journal, october 2001, pp. 36-40, ISSN 0043-2296.
35. KNOPP, N., KILLING, R. SOLINGEN, B.: Arc brazing - Innovative, safe and economical, EWM Hightec Welding GmbH Germany, 2006
36. KOU, S.: Welding Metallurgy, 2nd Ed., New York, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
37. LANCASTER, J.F,: Metallurgy of welding, brazing and soldering, London, 1999, ISBN: 1884207804
38. LEVY, C.: Les aciers revetus, 3<sup>eme</sup> Partie: Soudage par resistance par points des aciers revetus, SOUDER, 1997, nr. 6, p. 23-37
39. LEVY, C.: Soudage des aciers galvanises, 2<sup>eme</sup> Partie: Soudage a la flamme, soudage et soudobrasage des aciers galvanises, SOUDER, 1997, nr. 3, p. 3-14 ;
40. LEVY, C.: Soudage des aciers galvanises, 1<sup>me</sup> Partie: Les aciers revetus, SOUDER, 1997, nr. 2, pp. 23-35;
41. LI, RUI-FENG, ZHI-SHUI, YU, KAI QI: Interfacial structure and joint strengthening in arc brazed galvanized steels with cooper based filler

- ,Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Elsevier LTD,2006, vol.16 ,issue 2, apr, pp.397-401
42. LIN, S.B. , FAN, C.L. , SONG, J.L. ; YANG, C.L.: Research on CMT welding of nickel-based alloy with stainless steel, CHINA WELDING, 2007, vol. 16, nr.3, pp. 23-26, ISSN: 1004-5341
  43. LU, FG; LU, BF; TANG, XH.: Study of influencing factors and joint performance of laser brazing on zinc-coated steel plate, International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, Volume: 37 Issue: 9-10 , pp. 961-965, Published: 2008
  44. LUTZ, W.: Hot exhaust component perfectly „cold” welded with a robot, Praktiker, 2007, vol. 59, nr. 5, pp. 162-164, ISSN: 0554-9965
  45. DOMPABLO, M.: New developments in welding technology Cold arc and Force arc, Saldatura Tecnologias de Union, 2007, vol. 18, nr. 106, July-Aug, pp. 19-25, ISSN 1130-0280
  46. MAGALHAES, P., VILACA, P., QUINTINO, L., STARKE G.: Guidelines for development of welding control and monitoring systems, Report AUTOJOIN European Thematic Network, 2002
  47. **MAGDA, A.**, MILOȘ, L., NEGOIȚESCU, S.: Influența materialelor de adaos asupra procesului de lipire tare a oțelurilor galvanizate, Conferința Internațională: Integritatea structurală a construcțiilor sudate – ISIM Timișoara, 2006
  48. **MAGDA, A.**, POPESCU, M., CODREAN, C., MOCUȚA, G.E.: Possibilities offered by CMT process – joining galvanized steels, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach, nr. 5, 2009, pp.48-50, ISSN 0867-583X
  49. **MAGDA, A.**, POPESCU, M., MOCUȚA, G.E., NICOARĂ, M., RĂDUJĂ, A., BELU-NICA, R.: L’utilisation des aciers revetus dans l’industrie d’automobiles, The Scientific Symposium Transport and Logistics - Postadhering Development”16-17 October 2008, Timișoara, România, Bulletin of the POLITEHNICA University of Timisoara Transactions on Mechanics vol. S2, ISSN 1224-6077
  50. **MAGDA, A.**, POPESCU, M., NEGOIȚESCU, S.: Problems of galvanized steel, Bulletin of the POLITEHNICA University of Timisoara Transactions on Mechanics, Seria Mecanica, Fasc. 1, 2008, Tom 53(67), ISSN 1224-6077
  51. **MAGDA, A.**, POPESCU, M., RADUTA, A., NICOARA, M., VOICU, A.: Emission factors during the galvanizing process, ANNALS of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering, Vol VIII (XVIII), 2009, pp. 1221-1228, ISSN 1583-0691,
  52. **MAGDA, A.**, MILOȘ, L., POPESCU, M.: Brazing MIG technology for joining galvanized steel approach in the context of durable development, The 2-nd

- International Conference Innovative technologies for joining advanced materials, Timișoara, România, 12-13.06.2008, pp. 137-141, ISSN 1844-4938
53. **MAGDA, A.**, POPESCU, M., LOCOVEI, C., CODREAN, C., MOCUTA, G.E., HLUSCU, M.: Galvanized steel welding using the cold transfer process (CMT), 9th International Conference "Research and Development in Mechanical Industry" RaDMI, Vrnjacka Banja, Serbia, 2009, 16-19 sept., ISSN 86-83803-21-X (HTMS)
  54. **MAGDA, A.**, POPESCU M., MOCUTA G.E., BELU-NICA R.: Aspects spécifiques des revêtements - les aciers revêtus dans l'industrie d'automobile, 1st International Conference Science and Higher Education in Function of Sustainable Development SED 2008, Užice, Serbia, 17- 19 sept. ISSN 86-83803-21-X (HTMS)
  55. **MAGDA, A.**, POPESCU, M., NICOARA, M, DEMIAN, C, VOICU, A: Le comportement des aciers galvanisés soudés par procedes à l'arc et brasage, au point de vue du «développement durable», Cofret '08, Nantes, France, 2008, ISSN 2.6905267.61.5
  56. **MAGDA, A.**, CODREAN, C., POPESCU, M., : Galvanized sheet brazing, Scientific Bulletin of the POLITEHNICA University of Timisoara Transactions on Mechanics, Seria Mecanica, Fasc. 3, 2008, Tom 53(67), pp. 69-72, ISSN 1224-6077
  57. MARKOVITS, T., TAKÁCS, J., LOVAS, A., BELT, J.: Laser brazing of aluminium. J Mat Process Tech., 143-144:651-655, 2003
  58. MATHIEU, A., PONTEVICCI, S., VIALA, J,, CICALA, E., MATTEÏ, S., GREVEY, D.: Laser brazing of a steel/aluminium assembly with hot filler wire. Mat Sci Eng, 2006 A 435-436:19-28
  59. MATSUSAKA, S.; UEZONO, T.; TSUMURA, T.: Laser-arc hybrid welding process of galvanized steel sheets, Information: International Welding/Joining Conference-Korea (IWJC-Korea 2007), Date: MAY 10-12, 2007 Seoul South Korea, Advanced Welding And Micro Joining / Packaging For The 21st Century, Volume: 580-582, pp. 355-358 Published: 2008
  60. MATUSIAK, J., CZWORNOG, B., PFEIFER, T.: Low heat input MIG/MAG welding and braze welding methods and elements, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2007, nr. 6, pp. 41-46, ISSN 0867-583x
  61. MATUSIAK, J., s.a.: New, low heat input MIG/MAG welding processes in respect of reduction in emission of pollutants, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2007, vol. 51, nr. 5, pp. 49-55, ISSN: 0867-583X
  62. MATZ, C., WILHELM, G.: Silikatfreies MAG - Dunnablechschweissen, Schweisstechnik / Soudure, nr., 2009, pp. 30-32

63. MESSLER, R.W., Jr.: Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
64. MITSUAKI, K., KAZUMASA, N., TOMIKO, Y., KAZUTOSHI, F., TAKASHI, T.: Welding of galvanized steel sheet and aluminium alloy sheet using CMT welding, Press Working Journal, vol. 45, no. 1. pp. 62-69, ISSN 0387-3544
65. MRAZ, L., LESAY, J.: Problems with reliability and safety of hot dip galvanized steel structures Soldagem & Inspecao, volume: 14, Issue: 2, pp. 184-190, Published: apr-jun 2009
66. O'Brien, R.L.: Jefferson's New Welding Encyclopedia, 18 th ed., Miami, FL, American
67. OPREA, M.: Protecția anticorozivă, Editura Eurostampa, Timișoara, 1998
68. PARYS, D.: Welding hot galvanised steel requires few adjustments, Metallerie, nr. 89, 2006, pp. 41
69. POPESCU, M., **MAGDA, A.**, MOCUTA, E. VARTOLOMEI, S., GROZA, C.: Economical technology for joining dissimilar materials in automotive industry, DAAM Symposium, Viena 2009
70. POPESCU, M., **MAGDA, A.**, MOCUTA, G.E., RADUTA, A., NICOARA, M., LOCOVEI, C.: Welding galvanized steel – safely – CMT welding case, ANNALS of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering, Vol VIII (XVIII), 2009, pp. 1350-1356, ISSN 1583-0691
71. POPESCU, M., MOCUTA, G.E., RADUTA, A., **MAGDA, A.**: Safely – CMT welding case study, International Conference Management and Sustainable Protection of Environment, Alba-Iulia, 6-7 may 2009
72. POPESCU, M., MOCUȚA, G.E., **MAGDA, A.**, MARTA, C., CANEPARU, A., LOCOVEI, C., NICA BELU, R., BODNĂRESCU, C.: Recent advances in cold metal transfer for transportation vehicle, The Scientific Symposium Transport and Logistics - Postadhering Developpment"16-17 October 2008, Timișoara, România, Buletinul Științific UPT, Seria Mecanica, vol. S2, ISSN 1224-6077
73. POPESCU, M., **MAGDA, A.**, MOCUTA, G.E., DEMIAN, C., PERIANU, I.A.: Comparative approach of MIG/MAG brazing and CMT galvanized steel joining processes for automotive applications, Scientific Bulletin of the „POLITEHNICA” University of Timișoara, Romania, Transactions on MECHANICS, 2008, Tom 53 (67), Fasc. 2, pp.62-67 , ISSN 1224-6077
74. POPESCU, M., **MAGDA, A.**: Acoperiri termice și recondiționări – Aplicații, Ed. Politehnica Timișoara, 2007, ISBN 973-625-272-8

168 Bibliografie

75. POPESCU, M., MARTA, C., **MAGDA, A.**, VOICU A., LOCOVEI, C., DUPTA, A.: Acoperiri termice și recondiționări – Teme experimentale, Ed. Politehnica Timișoara, 2008, ISBN 978-973-623-3
76. POPESCU, M., MOCUTA, G.E., **MAGDA, A.**, DEMIAN, C., PERIANU, I.A.: Innovative welding processes thin sheet galvanized steel for automotive, 8th International Conference <sup>2</sup>Research and Development in Mechanical Industry<sup>2</sup> RaDMI, Užice, Serbia, 2008, 14-17 sept., ISSN 86-83803-21-X (HTMS)
77. QUINTINO, L., IORDACHESCU, D.: Control and monitoring in arc welding – time for reassessment, 56 Anual Assembly of the International Institute of Welding, the International Conference of Romanian Association of Welding, Bucharest, Romania, 6-11 july, 2003
78. QUINTINO, L., PIMENTA, G., IORDĂCHESCU, D., MIRANDA, R.M., PEPE, N.V.: MIG Brazing of galvanized thin sheet joints for automotive industry, Material and Manufacturing Processes, 2006, vol. 21, issue 1, ISSN 0361-8773, pp. 63-73
79. ROSADO, T., ALMEIDA, P., PIRES, I., MIRANDA, R., QUINTINO, L.: Innovations in arc welding, 5 Congresso Luso-Mocambicano de Engenharia, Maputo, 2-4 Setembro 2008, ISBN 978-972-8826-20-8
80. SCHMIDT, J.: Construcții din oțel sudate, zincate la cald prin imersionare - Observații privind materialul și calitatea, PRACTICIANUL SUDOR, 1998, nr. 1, p.28-32;
81. SCHMIDT, J.: Protecția anticorozivă cu zinc. Elementul chimic zinc – importanța lui ca material anticoroziv, PRACTICIANUL SUDOR, 1998, nr. 1, p. 20-23
82. SCHMIDT, J.: Protecție anticorozivă cu zinc - pentru înțelegere între constructorul de structuri din oțel și cel care zincheză, Practicianul Sudor, 1998, nr. 1, pp.24-27;
83. SCHMIDT, J.: Sudarea elementelor constructive zincate din structurile sudate de oțel - Asigurarea calității și protecția anticorozivă, PRACTICIANUL SUDOR, 1998, nr. 2, pp. 23-29;
84. SCHMIDT, J.: Protecția anticorozivă și grosimea straturilor protectoare la construcțiile din oțel, zincate la cald. Grosimea stratului și măsurarea acestei grosimi, PRACTICIANUL SUDOR, 1998, nr. 2, pp. 30-35;
85. SERÉ, P. R., CULCASI, J. D., ELSNER, C. I., DI SARLI, A. R.: Relationship between texture and corrosion resistance in hot-dip galvanized steel sheets, Surface and Coatings Technology, Volume 122, Issues 2-3, 15 December 1999, pp. 143-149, ISSN 0257-8972

86. STAUBACH, M. ș.a.: Joining of steel-aluminium dissimilar joints with low energy GMA process and filler materials based on aluminium and zinc, SCHWEISSEN UND SCHNEIDEN, 2007, vol. 59, nr. 6, pp. 302, 304-310, 312-313, ISSN: 0036-7184
87. STAUBACH, M. ș.a.: Joining of steel-aluminium mixed joints with energy reduced GMA processes and filler materials on an aluminium and zinc basis, Welding and Cutting, 2008, vol. 7, nr. 1, pp. 30-34
88. STAUFER, H.; RÜHRNÖBL, M.; MIESSBACHER, G.: LaserHybrid Welding and LaserBrazing State of the Art in Technology and Practice by the Examples of the Audi A8 and VW-Phaeton, 2008
89. SUBU, T. s.a: Încărcarea prin sudare și metalizare pentru recondiționarea pieselor și fabricarea de piese noi, OID-ICM București, 1992
90. ȘERBAN, V.A., RĂDUȚĂ, A., Știința și ingineria materialelor, Ed. Politehnica, Timișoara, 2006
91. THORNE, P., GEIRMAN, P.: New approach for projection welding coated sheet metal. Doc. IIW-818-85,p. 2-9
92. TROMMER, G., FRITSCH, H. P.: Cladding takes care of longer lifespan for components under high stress, immune against surface wear, Technica, 2007, vol. 56, m. 9, pp. 105-107, ISSN: 0040-0866
93. TROMMER, G.: From the experience of a waged welder – spatter – free welding and brazing with the CMT process, Praktiker, 2005, vol. 57, nr. 9, pp. 250, 252-254
94. TZENG, Y.E.: Pulsed Nd:YAG laser. Seam welding of zinc – coated steel, Welding Journal, July 1999, pp. 238s-244s, ISSN 0043-2296
95. TZENG, Y.F.: Pulsed Nd:YAG laser seam welding of zinc coated steel. Weld J 78:233s-244s
96. TZENG, YF, CHEN, FC: Effects of operating parameters on the static properties of pulsed laser welded zinc-coated steel. J Adv Manuf Technol 18:641-647Welding Society, 1997.
97. UDRESCU, L.: Tratamente de suprafața și acoperiri, Editura Politehnica, Timișoara, 2000;
98. VERSTAPPEN, H.G.J.M., SUSTEREN, van S.J., OOOI van W.J.: Durability of powder – coated hot-dip galvanized steel, Journal of Coatings Technology, 2002, vol 74, nr. 7, pp. 43-54, ISSN 1547-0091
99. WANG, L.: Dynamic simulation of resistance spot welding of zinc-coated steels, China Welding, 2006, vol. 15, nr.4, pp. 39-42
100. WIDMANN G.: Interpreting TGA curves ,UserCom -Information for users of Mettler Toledo thermal analysis systems pp.1--4,2001/1 ,vol.13

170 Bibliografie

101. WILDEN, J., ş.a.: Cladding (surfacing) of aluminium substrates with nanocrystalline solidifying wear resistant iron based materials, International Thermal Spray Conference, ITSC 2007, 14-16 may, pp. 1075-1079, ISBN: 9780871708557
102. WILDEN, J.; BERGMANN, J.P.: Low temperature brazing of zinc coated steel and steel/aluminium joints by setting ZnAl – alloys as brazing material, Brazing and Soldering, Proceedings, 2006, apr., pp. 32-39, ISBN: 0-87170-838-8
103. XIE, I., DENNEY, P.: Galvanized steel joining with lasers, Welding Journal, pp. 59-62, june 2001, ISSN 0043-2296
104. YANG, X.R.: Welding of thin sheet metals by MIG/MAG process with CMT, Welding Technology in Energy Engineering, IFWT, Proceedings, 21-23 sept. 2005, pp. 2008-2012, ISBN: 7-1111-7383-X
105. YANG, SL.; HUANG, W.; LIN, DC.: Hybrid laser-gtaw welding of galvanized high-strength steels in a gap-free lap joint configuration, Symposium on Extraction and Processing Division held at the TMS 2009 Annual Meeting and Exhibition, Date: FEB 15-19, 2009 San Francisco CA, Source: EPD CONGRESS 2009, PROCEEDINGS, pp. 575-582, Published: 2009
106. YANG, SL.; HUANG, W.; LIN, DC.: Monitoring of the spatter formation in laser welding of galvanized steels in lap joint configuration by the measurement of the acoustic emission, Proceedings of the ASME International manufacturing Science and Engineering Conference 2008, vol 1, pp. 143-146, published: 2009
107. YU, Z.S., LI, R.F., ZHOU, F.M., WU M.F., QI K., QIAN Y.Y.: Joint evolution and strengthening mechanism in arc brazed galvanized steel with CuSi3 filler, Material Science and Technology, 2004, vol. 20, no. 11, pp. 1479-1483, ISSN 0267-0836
108. YU, ZHI-SHUI, RUI FENG, LI, KAI, QI: Growth behaviour of interfacial compounds in galvanized steel joints with Cu Si3 filler under arc brazing, Transaction of Nonferrous metals Society of China, Elsevier LTD, 2006
109. ZHANG, H.T., FENG, J.C., HE. P., ZHANG, B.B., CHEN, J.M, WANG, L.: The arc characteristics and metal transfer behaviour of cold metal transfer and its use in joining aluminium to zinc-coated steel, Materials Science and Engineering, 2009, vol. 499, issues 1-2, pp. 111-113
110. ZUBIRI, F., GARCIANDIA, A., CORTICELLA, I., PENA, I.M., BERRUETA, I.L. BOCOS, Y.: Aplicacion de la tecnologia laser a la soldadura fuerte y blanda en chapas de acero recubierto, Revista de la Soldadura, ano XVIII, nr.103, 2007, pp. 26-32, ISSN 1130-0820



111. ZURBRINGGEN, V.: Investigation of the segregation behavior of diferent constituents with TGA/SDTA ,UserCom nr.1/2001, pp.9-11
112. XXX. [www.ewm.de](http://www.ewm.de)
113. XXX: [www.fronius.com](http://www.fronius.com)
114. XXX: Cold Metal Transfer digital GMA welding, Australasian Welding Journal, 2005, vol.50, pp. 14-15
115. XXX: Colectia de standarde comentate, vol I-VII, Editura Sudura, Timisoara, 2001-2005.
116. XXX: EWM, Schweißen and Schneiden 2005
117. XXX: GalvoInfo Center, Corrosion- Mechanisms, prevention and testing, Handbook 2008
118. XXX: <http://www.galvazinc.com/> Acier galvanise
119. XXX:2008, Annual report of zinc market
120. XXX: Metal Bulletin's 12<sup>th</sup> zinc and its markets seminar, Brussels, 2008
121. XXX: New DMA/DSTA861e UserCom nr1/2001, pp.5-6
122. XXX: Procedure for seam welding of uncoated and coated low carbon steel sheet, Doc. IIW - III - 1090 - 97, nr. 3, 1997, pp. 1-15

## ANEXE

### ANEXA 1

#### CARACTERISTICILE TEHNICE ALE SURSEI DE SUDARE TRANS PULS SYNERGIC 2700 CMT

CARACTERISTICA TEHNICĂ	TPS 2700 CMT
Tensiune de alimentare	3 x 400 V +/- 15%
Putere consumată la 100%:	4,5 kVA
Domeniul de curent (MIG/MAG):	3 - 270A
Domeniul de curent (Electrod):	10 - 270A
Curent maxim la 40% (10 min./40°C):	270 A
Curent maxim la 60% (10 min./40°C):	210 A
Curent maxim la 100% (10 min./40°C):	170 A
Tensiunea de lucru (MIG/MAG):	14,2-27,5 V
Clasa de protecție	IP 23
Clasa de izolație	F
Dimensiuni (mm)	625x290x480
Greutate	28 kg
Tip de omologare	S, CE, CS

**ANEXA 2****CONCENTRAȚIA PROCENTUALĂ TABLĂ ALIAJ ALUMINIU**

Concentrația procentuală	1	2	3	Media determinărilor	Abaterea pătratică medie
Al	96.25	96.48	96.29	96.34	0.1231
Si	0.1694	0.1769	0.1721	0.1728	0.0038
Fe	0.2558	0.2424	0.2484	0.2489	0.0067
Cu	0	0	0	0	0
Mn	0.3146	0.3082	0.3112	0.3114	0.0032
Mg	2.903	2.686	2.863	2.817	0.1158
Cr	0	0	0	0	0
Zn	0	0	0	0	0
Ti	<0.009	<0.006	<0.010	<0.008	0.0024

**CONCENTRAȚIA PROCENTUALĂ TABLĂ OȚEL**

Concentrația procentuală	1	2	3	4	Media determinărilor	Abaterea pătratică medie
Fe	99.51	99.52	99.53	99.53	99.52	0.0072
C	0.0607	0.0633	0.0565	0.0568	0.0593	0.0033
Si	0.0269	0.0148	0.0136	<0.007	<0.015	0.0082
Mn	0.1931	0.1870	0.1909	0.1876	0.1897	0.0029
P	0	0	0	0	0	0
S	<0.000	<0.002	<0.000	<0.000	<0.000	0.0011
Cr	0.0107	0.0148	0.0123	0.0137	0.0129	0.0018
Ni	0.0140	0.0141	<0.009	<0.009	<0.011	0.0025
Mo	0.0182	0.0216	0.0175	0.0435	0.0252	0.0124
Cu	0.0175	0.0229	0.0163	0.0166	0.0183	0.0031
Al	0.0389	0.0388	0.0519	0.0344	0.0410	0.0075
Ti	<0.003	<0.003	<0.001	<0.003	<0.002	0.0007
V	<0.002	<0.001	<0.002	<0.000	<0.001	0.0011
Co	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	0.0003
Nb	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	0.0002
W	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	<0.000	0.0000

**ANEXA 3**

## SUCESIUNEA COMENZILOR LA ÎMBINAREA OJELURILOR GALVANIZATE

```
C*
C* COSMOS/M Geostar V2.50
C* Problem : SUDURA2 Date : 07-01-2009 Time : 12:48:26
C*
C* FILE,C:\Cosmosm\Working\SUDURA1.ses,1,1,1,1
PT,1,0,0,0
PT,2,20,0,0
PT,3,20,0,-1.5
PT,4,0,0,-1.5
CRPLINE,1,1,2,3,4,1
SF2CR,1,1,3,0
VLEXTR,1,1,1,Y,60
VLGEN,1,1,1,1,0,0,-40,1.5
PTGEN,1,1,2,1,0,0,-1.5,0
CRLINE,26,17,18
VLCRSF,3,26,1,1
EGROUP,1,SOLID,0,1,0,0,0,0,0,0
MPROP,1,EX,210000
MPROP,1,NUXY,.3
M_VL,1,1,1,8,40,3,60,1,1,1
M_VL,2,2,1,8,40,3,60,1,1,1
EGROUP,2,TETRA4,0,1,0,0,0,0,0,0
MPROP,1,EX,110000
MPROP,1,NUXY,.3
M_VL,3,3,1,4,40,3,3,1,1,1
VIEW,0,0,1,0
SCALE,0
INITSEL,ND,1,1
SELINP,ND,1,164,1,1
SELINP,ND,16237,16728,1,1
SELINP,ND,20009,20664,1,1
NMERGE,1,20664,1,0.0001,0,1,0
NCOMPRES,1,20541
DCR,17,AL,0,17,1
FCR,8,FY,20,8,1
VIEW,1,1,1,0
INITSEL,ND,1,1
SELINP,ND,1,500000,1,1
CLS,1
INITSEL,CR,1,1
SELINP,CR,1,501,1,1
FCR,8,FY,20,8,1
DCR,17,AL,0,17,1
VIEW,1,0,0,0
A_STRESS,1,25,1,1,1,0,0,0,1,1
STRESS,1
C* R_STATIC
```

TOTAL SYSTEM DATA

NUMBER OF EQUATIONS . . . . .(NEQ) = 60762  
 MAXIMUM HALF BANDWIDTH . . . . . (MK ) = 1  
 MEAN HALF BANDWIDTH . . . . .(MM ) = 73  
 NUMBER OF ELEMENTS. . . . .(NUME) = 16200  
 NUMBER OF NODAL POINTS. . . . .(NUMNP)= 20295  
  
 ORIGINAL NO. OF MATRIX ELEMENTS . . . . .(NWK) = 2022092

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*  
 \* RESPONSE PRINTOUT (LOAD CASE 1) \*  
 \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

STATUS OF THERMAL EFFECTS FOR THIS LOAD CASE:

-----  
 - Thermal flag is off (no thermal effect)

DISPLACEMENTS

NODE	X-DISPL.	Y-DISPL.	Z-DISPL.	XX-ROT.	YY-ROT.	ZZ-ROT.
1	5.36794E-04	3.87978E-02	0.13878	0.00000	0.00000	0.00000
2	5.16750E-04	3.88225E-02	0.13881	0.00000	0.00000	0.00000
3	4.87694E-04	3.88501E-02	0.13883	0.00000	0.00000	0.00000
4	4.54865E-04	3.88753E-02	0.13885	0.00000	0.00000	0.00000
5	4.21940E-04	3.88952E-02	0.13888	0.00000	0.00000	0.00000

NODE	X-DISPL.	Y-DISPL.	Z-DISPL.	XX-ROT.	YY-ROT.	ZZ-ROT.
20293	-5.10746E-04	3.85315E-02	0.10509	0.00000	0.00000	0.00000
20294	-5.28471E-04	3.85223E-02	0.10500	0.00000	0.00000	0.00000
20295	-5.29850E-04	3.84911E-02	0.10498	0.00000	0.00000	0.00000

MINIMUM/MAXIMUM DISPLACEMENTS

NODE 9881 10128 9861 1 1 1  
 MIN. -3.46850E-03 0.00000 -0.31547 0.00000 0.00000 0.00000

NODE 9841 9881 19967 20295 20295 20295  
 MAX. 3.29564E-03 0.10041 0.58520 0.00000 0.00000 0.00000

MAXIMUM RESULTANT DISPLACEMENT

NODE 19967  
 MAX. 0.58648

TOTAL STRAIN ENERGY. . . . . = 0.404864E+02

REACTION FORCE FOR LOAD CASE NO. 1

NODE	CSYS	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
10128	0	-3.194	-10.05	3.762	-----	-----	-----
10129	0	-3.486	-16.81	5.490	-----	-----	-----
10130	0	-3.567	-17.10	2.672	-----	-----	-----
10131	0	-2.946	-18.13	0.8138	-----	-----	-----
10132	0	-2.370	-19.00	-.2627	-----	-----	-----
10133	0	-1.909	-19.67	-.8062	-----	-----	-----
10134	0	-1.579	-20.17	-1.030	-----	-----	-----
10135	0	-1.342	-20.54	-1.083	-----	-----	-----
10136	0	-1.167	-20.82	-1.055	-----	-----	-----
10137	0	-1.028	-21.04	-.9936	-----	-----	-----
10138	0	-.9121	-21.21	-.9235	-----	-----	-----
10139	0	-.8085	-21.34	-.8565	-----	-----	-----
10140	0	-.7121	-21.45	-.7972	-----	-----	-----
10141	0	-.6196	-21.54	-.7471	-----	-----	-----
10142	0	-.5293	-21.61	-.7061	-----	-----	-----
10143	0	-.4401	-21.66	-.6733	-----	-----	-----
10144	0	-.3516	-21.71	-.6479	-----	-----	-----
10145	0	-.2635	-21.74	-.6289	-----	-----	-----
10146	0	-.1756	-21.77	-.6159	-----	-----	-----
10147	0	-.8775E-01	-21.78	-.6083	-----	-----	-----
10148	0	0.6462E-06	-21.78	-.6057	-----	-----	-----
10149	0	0.8776E-01	-21.78	-.6083	-----	-----	-----
10150	0	0.1756	-21.77	-.6159	-----	-----	-----
10151	0	0.2635	-21.74	-.6289	-----	-----	-----
10152	0	0.3516	-21.71	-.6478	-----	-----	-----
10153	0	0.4401	-21.66	-.6733	-----	-----	-----
10154	0	0.5293	-21.61	-.7061	-----	-----	-----
10155	0	0.6196	-21.54	-.7471	-----	-----	-----
10156	0	0.7121	-21.45	-.7972	-----	-----	-----
10157	0	0.8085	-21.34	-.8565	-----	-----	-----
10158	0	0.9121	-21.21	-.9235	-----	-----	-----
10159	0	1.028	-21.04	-.9936	-----	-----	-----
10160	0	1.167	-20.82	-1.055	-----	-----	-----
10161	0	1.342	-20.54	-1.083	-----	-----	-----

10162	0	1.579	-20.17	-1.030	-----	-----	-----
10163	0	1.909	-19.67	-.8062	-----	-----	-----
10164	0	2.370	-19.00	-.2627	-----	-----	-----
10165	0	2.946	-18.13	0.8138	-----	-----	-----
10166	0	3.567	-17.10	2.672	-----	-----	-----
10167	0	3.486	-16.81	5.490	-----	-----	-----
10168	0	3.194	-10.05	3.762	-----	-----	-----

FOR REQUESTED (Global Cartesian Coord. System)  
 NODES FX FY FZ MX MY MZ  
 Total React. 0.3941E-09 -.8200E+03 -.3194E-09 0.0000E+00 0.0000E+00  
 0.0000E+00

SOLUTION TIME LOG IN SEC  
 FOR PROBLEM  
 TIME FOR INPUT PHASE ..... = 1  
 TIME FOR CALCULATION OF STRUCTURE STIFFNESS MATRIX= 2  
 TRIANGULARIZATION OF STIFFNESS MATRIX ..... = 17  
 TIME FOR LOAD CASE SOLUTIONS ..... = 0  
 TIME FOR REACTION/GRID FORCE BALANCE ..... = -20  
 TOTAL SOLUTION TIME ..... = 1  
 ( 0: 0: 1)

1

STRESS EVALUATION FOR STATIC ANALYSIS

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*  
 \* STRESS PRINTOUT (LOAD CASE 1) \*  
 \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

STATUS OF THERMAL EFFECTS FOR THIS LOAD CASE:  
 -----

- Thermal flag is off (no thermal effect)

\*\*\*\* NOTE: <STRESS PRINT FLAG IS OFF> \*\*\*\*

PRINCIPAL STRESS (AT CENTER)		DIRECTION COSINES	
S1 = .721921E+02	.144693E+00	.986335E+00	.787815E-01
S2 = .494378E+01	-.965719E+00	.123428E+00	.228370E+00
S3 = -.634701E+01	.215524E+00	-.109124E+00	.970382E+00

PRINCIPAL STRESS (AT CENTER)		DIRECTION COSINES	
S1 = .709925E+02	.193540E+00	.981092E+00	.615334E-03
S2 = .609887E+01	-.973225E+00	.191908E+00	.126509E+00
S3 = -.495097E+00	.123993E+00	-.250822E-01	.991966E+00

PRINCIPAL STRESS (AT CENTER)		DIRECTION COSINES	
S1 = .737517E+02	-.171186E+00	-.984652E+00	.340069E-01
S2 = .947861E+01	.984948E+00	-.170195E+00	.301902E-01
S3 = .265314E+01	-.239161E-01	.386592E-01	.998966E+00

PRINCIPAL STRESS (AT CENTER)		DIRECTION COSINES	
S1 = .767294E+02	-.144936E+00	-.987883E+00	.555125E-01
S2 = .124827E+02	.987054E+00	-.140463E+00	.774298E-01
S3 = .430695E+01	-.686865E-01	.660150E-01	.995452E+00

PRINCIPAL STRESS (AT CENTER)		DIRECTION COSINES	
S1 = .795368E+02	-.121549E+00	-.990311E+00	.671614E-01
S2 = .149613E+02	.990598E+00	-.116748E+00	.713099E-01
S3 = .531871E+01	-.627708E-01	.751968E-01	.995191E+00

## ANEXA 4

### SUCCESIUNEA COMENZILOR LA MODELAREA ÎMBINĂRILOR OȚEL GALVANIZAT - ALUMINIU

```

C* COSMOS/M    Geostar V2.50
C* Problem : viti1    Date : 07-02-2009    Time : 12:53:54
C*
C* FILE,C:\Cosmosm\Working\sudViti2.ses,1,1,1,1
PT,1,0,0,0
PT,2,20,0,0
PT,3,20,0,-1.5
PT,4,0,0,-1.5
CRPLINE,1,1,2,3,4,1
SF2CR,1,1,3,0
VLEXTR,1,1,1,Y,40
VLGEN,1,1,1,1,0,0,-20,1.5
PTGEN,1,1,2,1,0,0,-1.5,0
CRLINE,26,17,18
VLCRSF,3,26,1,1
EGROUP,1,SOLID,0,1,0,0,0,0,0,0
MPROP,1,EX,210000

```



```

MPROP,1,NUXY,.3
M_VL,1,1,1,8,40,3,80,1,1,1
MPROP,2,EX,70000
MPROP,2,NUXY,.24
M_VL,2,2,1,8,40,3,80,1,1,1
EGROUP,2,TETRA4,0,1,0,0,0,0,0,0
MPROP,3,EX,105000
MPROP,3,NUXY,.26
M_VL,3,3,1,4,40,3,3,1,1,1
VIEW,0,0,1,0
SCALE,0
INITSEL,ND,1,1
SELINP,ND,1,164,1,1
SELINP,ND,19353,20008,1,1
SELINP,ND,26569,27224,1,1
VIEW,1,1,-1,0
NMERGE,1,500000,1,0.0001,0,0,0
NCOMPRESS,1,27060
VIEW,1,0,0,0
SCALE,0
VIEW,1,1,-1,0
DCR,17,AL,0,17,1
FCR,8,FY,20,8,1
INITSEL,ND,1,0
A_STRESS,1,-1,1,1,1,0,0,0,1,1
STRESS,1
C* R_STATIC

```

#### Fişierul cu rezultatele analizei

```

Problem name: viti1
Date       : 07/02/2009   Time: 12:58:45
Title      :
TOTAL SYSTEM DATA
NUMBER OF EQUATIONS .....(NEQ) = 80196
MAXIMUM HALF BANDWIDTH ..... (MK ) = 1
MEAN HALF BANDWIDTH .....(MM ) = 73
NUMBER OF ELEMENTS. ....(NUME) = 21000
NUMBER OF NODAL POINTS. ....(NUMNP)= 26773

ORIGINAL NO. OF MATRIX ELEMENTS .....(NWK) = 2682179

DISPLACEMENTS

NODE X-DISPL. Y-DISPL. Z-DISPL. XX-ROT. YY-ROT. ZZ-ROT.
1 5.53031E-04 2.98098E-02 -4.75313E-02 0.00000 0.00000
0.00000
2 5.13526E-04 2.98512E-02 -4.76219E-02 0.00000 0.00000
0.00000

```

3 4.76516E-04 2.98966E-02 -4.77053E-02 0.00000 0.00000  
0.00000

.....  
26772 -5.14896E-04 3.52443E-02 -5.88570E-02 0.00000 0.00000  
0.00000

26773 -5.44480E-04 3.51517E-02 -5.88034E-02 0.00000 0.00000  
0.00000

MINIMUM/MAXIMUM DISPLACEMENTS

NODE 16564 13408 17098 1 1 1  
MIN. -2.49582E-03 0.00000 -0.10622 0.00000 0.00000 0.00000

NODE 16524 13161 26445 26773 26773 26773  
MAX. 2.49729E-03 5.20172E-02 0.17946 0.00000 0.00000  
0.00000

MAXIMUM RESULTANT DISPLACEMENT

NODE 26527  
MAX. 0.18194

TOTAL STRAIN ENERGY. . . . . = 0.209357E+02

REACTION FORCE FOR LOAD CASE NO. 1

NODE	CSYS	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
13408	0	-2.428	-10.75	2.218	-----	-----	-----
13409	0	-3.223	-18.37	3.379	-----	-----	-----
13410	0	-2.957	-18.51	1.790	-----	-----	-----
.....							
13444	0	2.002	-19.71	-.1545	-----	-----	-----
13445	0	2.451	-19.17	0.5969	-----	-----	-----
13446	0	2.957	-18.51	1.789	-----	-----	-----
13447	0	3.223	-18.37	3.378	-----	-----	-----
13448	0	2.428	-10.75	2.218	-----	-----	-----

FOR REQUESTED (Global Cartesian Coord. System)

NODES FX FY FZ MX MY MZ  
Total React. -.5053E-10 -.8200E+03 -.3431E-09 0.0000E+00 0.0000E+00  
0.0000E+00

SOLUTION TIME LOG IN SEC

FOR PROBLEM

TIME FOR INPUT PHASE . . . . . = 2  
TIME FOR CALCULATION OF STRUCTURE STIFFNESS MATRIX= 2  
TRIANGULARIZATION OF STIFFNESS MATRIX . . . . . = 23  
TIME FOR LOAD CASE SOLUTIONS . . . . . = 0  
TIME FOR REACTION/GRID FORCE BALANCE . . . . . = -28  
TOTAL SOLUTION TIME . . . . . = 0  
( 0: 0: 0)

## STRESS EVALUATION FOR STATIC ANALYSIS

```
*****
*****
*      STRESS PRINTOUT (LOAD CASE 1)      *
*****
*****
```

STATUS OF THERMAL EFFECTS FOR THIS LOAD CASE:

-----  
- Thermal flag is off (no thermal effect)

\*\*\*\* NOTE: <STRESS PRINT FLAG IS OFF> \*\*\*\*

PRINCIPAL STRESS (AT CENTER)	DIRECTION COSINES		
S1 = .840687E+02	.123589E+00	.991809E+00	.322587E-01
S2 = .350118E+01	-.976243E+00	.115690E+00	.183211E+00
S3 = -.740801E+01	.177975E+00	-.541348E-01	.982545E+00

PRINCIPAL STRESS (AT CENTER)	DIRECTION COSINES		
S1 = .793675E+02	-.157366E+00	-.986943E+00	.343307E-01
S2 = .574368E+01	-.986030E+00	.158952E+00	.497822E-01
S3 = -.619660E+00	.545724E-01	.260199E-01	.998171E+00